

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА  
АНАЛИЗА РИСКА  
В ГАЗОВОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

---

Москва 1996

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА  
АНАЛИЗА РИСКА  
В ГАЗОВОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

---

Москва 1996

Настоящая работа является предварительным итогом многолетней совместной деятельности специалистов ВНИИГАЗ'а, Химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Аналитического центра ГИ РАН и ряда других организаций по разработке научно-методических основ анализа и управления показателями надежности и безопасности характерных объектов газовой отрасли с позиций методологии промышленного риска, получившей на сегодня за рубежом самое широкое распространение и рассматриваемой в качестве одного из наиболее эффективных механизмов экономического и административно-правового управления технологической и экологической безопасностью промышленных производств.

Работа ставит своей целью ознакомить ведущие проектные и научно-исследовательские организации газовой отрасли, а также руководящий аппарат предприятий с основными положениями методологии промышленного риска и ближайшими перспективами ее использования для экспертизы, лицензирования и страхования потенциально опасных производств. Основой работы послужило утвержденное РАО "ГАЗПРОМ" "Отраслевое руководство по анализу и управлению риском, связанным с техногенным воздействием на человека и окружающую среду при сооружении и эксплуатации объектов добычи, транспорта, хранения и переработки углеводородного сырья с целью повышения их надежности и безопасности", включающее в себя в виде приложений целый ряд практических примеров оценки риска объектов газовой промышленности (от месторождений по добыче газа до газоперерабатывающих заводов и экспортных морских терминалов по отгрузке сырья). В этих приложениях к "Отраслевому руководству..." дано обобщение статистики отказов и сценариев развития аварий, а также алгоритмы построения полей риска и обоснование механизмов управления риском с учетом технологической и региональной специфики объектов РАО "ГАЗПРОМ". С "Руководством..." и приложениями к нему можно ознакомиться в Управлении научно-технического прогресса и экологии РАО "ГАЗПРОМ", которому авторы выражают свою признательность за большое внимание и практическую помощь в подготовке настоящей работы.

В связи с предстоящей в ближайшем будущем разработкой деклараций по безопасности промышленных объектов (Постановление Правительства РФ от 1 июля 1995 г. №675 "О декларации безопасности промышленного объекта Российской Федерации"; Совместный приказ МЧС РФ и Госгортехнадзором РФ №222/59 от 4 апреля 1996 г. – "Порядок разработки декларации безопасности промышленного объекта Российской Федерации") авторы акцентировали основное внимание на построении общего алгоритма проведения анализа риска эксплуатации характерных объектов газовой отрасли.

© НУМЦ Минприроды России, 1996

© Сафонов Владимир Сергеевич

© Одишария Гурами Эрастович

© Швыряев Александр Анатольевич

ISBN 5-89414-003-X

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие систем топливной энергетики и объектов химической технологии связано с увеличением масштабов добычи и переработки нефти, газа и конденсата, со значительным возрастанием единичных мощностей установок и аппаратов, а также с усложнением самих технологических процессов и режимов управления производством. Как следствие, наряду с развитием научно-технического прогресса в промышленности имеет место устойчивая тенденция роста числа аварий со все более тяжелыми экологическими, экономическими и социальными последствиями. Безопасность, таким образом, выдвигается в число основных характеристик промышленных объектов. Это особо подчеркивается в принятых Правительством Федеральных целевых научно-технических программах "Экологическая безопасность России", "Химическая безопасность России", в которых поставлена задача безотлагательного решения широкого круга вопросов, связанных с технологической и экологической безопасностью энергетики и химии, предусмотрена разработка и внедрение "Методических руководств по оценке экологического риска от опасных производств", "Методологии минимизации риска" и ряда других нормативов.

В Российской Федерации от 11 ноября 1994 года принят Федеральный закон "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера". Этим законом административным органам предписывается соответствующее информирование населения о всех рисках, связанных с техногенной деятельностью в регионе, а также разработка комплекса мероприятий, направленных на обеспечение его безопасности.

До недавнего времени существовало глубокое убеждение, что разрабатываемые технические системы безопасности должны быть направлены на то, чтобы полностью исключить, предотвратить или, по крайней мере, локализовать наиболее опасные воздействия, вызванные так называемой "максимально возможной (из физических соображений) проектной аварией". Поэтому основное внимание было направлено на то, чтобы обезопасить персонал предприятия и население, проживающее вблизи него, именно от такого типа аварий.

Более глубокое изучение этой проблемы привело к осознанию необходимости рассматривать не только худшие случаи (т.е. крайне редкие катастрофические аварии), а также и аварии меньшего масштаба, но часто повторяющиеся, суммарный ущерб от которых может быть даже выше, чем от катастрофических аварий. Это, в свою очередь, привело к необходимости использовать понятие вероятности при оценках реализации опасных событий и возможных последствий.

Вероятность аварии, объединенная с возможными последствиями, и даст величину риска. Эта величина далее может быть изучена по своей структуре или сопоставлена с другими рисками, существующими в обществе, для выработки оптимальной стратегии по обеспечению безопасности людей и охране окружающей среды.

Расчет и анализ риска является тем методическим инструментом, при помощи которого потенциальная опасность может быть оценена количественно. Во многих случаях этот инструмент является по существу единственной возможностью исследовать сложные современные вопросы безопасности, ответ на которые не может быть получен из практического опыта, как, например, возникновение и развитие аварий с крайне малой вероятностью реализации, но с большими потенциальными последствиями.

Концептуальная основа анализа риска внешне проста. Она предполагает использование методических подходов, математического аппарата и информационной базы, позволяющих ответить на следующие вопросы:

1. Что может функционировать "неправильно" (в нерабочем режиме)?
2. Каковы причины этого?
3. Каковы возможные последствия?
4. Насколько это вероятно?

С позиции вероятностной логики понятие риск в классическом определении характеризуется сочетанием вероятностей: вероятностью возникновения неблагоприятного воздействия; вероятностью того, что возникает неблагоприятное воздействие именно данного типа и масштаба; вероятностью того, что именно данный тип воздействия вызывает определенную величину отклонений состояния субъекта от его динамического равновесия.

Итак, в общем случае потенциальная опасность в промышленности характеризуется, по крайней мере, двумя составляющими величинами - вероятностью возникновения аварии и величиной возможного экономического, экологического или социального ущерба.

Инженерные системы безопасности направлены на повышение надежности технических систем, т.е. на уменьшение вероятности возникновения аварии, а также на ограничение масштабов ее развития (защитные ограждения, термостойкие покрытия, водяные завесы и т.п.). Организационные меры безопасности - запрет на прохождение вблизи предприятий, системы раннего оповещения, эвакуационные планы, укрытия, адекватная реакция технического персонала и населения, индивидуальные средства защиты и т.д. - направлены на уменьшение потенциального ущерба в результате аварии. И те и другие в конечном итоге направлены на уменьшение уровня промышленного риска.

В технологическом смысле анализ риска представляет собой последовательность действий, упорядоченную по следующим этапам:

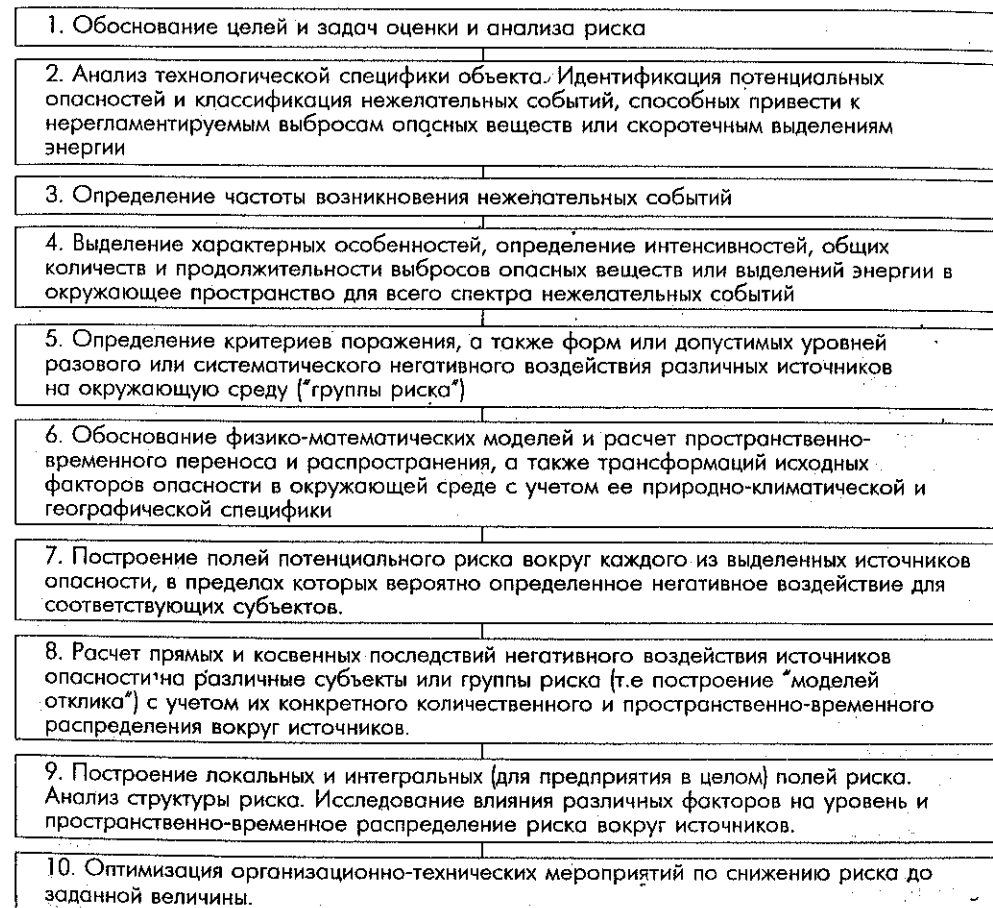
- 1) числовая оценка риска
- 2) анализ структуры риска
- 3) управление риском

Федеральная концепция промышленной безопасности должна строиться на единых принципах управления величиной риска, реализуемых по иерархической структуре (цех, завод, промзона, район, город, область) с оптимальным для каждого уровня использованием различных типовых Методов и Процедур (технических, организационных, социально-психологических). Они должны выбираться с учетом специфики данного объекта, вида и содержания опасности на этом и соседних объектах, а также общего уровня опасности жизни на данной территории.

В связи с изложенным возникает задача разработки научно-методической базы для количественной оценки и анализа риска промышленных предприятий различного назначения, а также типовых процедур проведения экспертизы характерных видов потенциальной опасности.

## ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕЙ И СРЕДСТВ РЕШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗАДАЧ АНАЛИЗА РИСКА

Общая логическая последовательность (структура) количественного анализа риска (АР) может быть представлена в виде следующей блок-схемы:



На первом весьма важном этапе на основании "Исходных требований..." Заказчика формулируются основные цели работы. С учетом исходной информации, име-



щих ресурсов (материальных, интеллектуальных, технических и т.п.) определяется необходимая глубина анализа и строится общий алгоритм (стратегия) решения поставленной задачи. Здесь же вырабатываются требования к информационному обеспечению отдельных этапов анализа.

Далее в зависимости от исходной цели проводится анализ технологической специфики самого объекта или в целом системы "объект - окружающая среда". С учетом требований первого этапа рассматривается и анализируется информация по технологиям, характеристикам основного оборудования, физико-химическим характеристикам веществ и материалов, системам управления и защиты и т.п., а также климатологические и географические характеристики окружающей среды, ситуационный план, генплан, объекты инфраструктуры, данные о техническом персонале и населении региона. При этом следует подчеркнуть, что речь идет в первую очередь об информации непосредственно или косвенно влияющей на возникновение, варианты (сценарии) развития и последствия аварий.

Большинство опасностей на промышленных объектах возникает в результате плановых (организованных) или аварийных (нерегламентированных) поступлений (выбросов) в атмосферу вредных (токсичных) или взрывопожароопасных веществ, а также в результате быстротечных выделений больших количеств энергии. Эти опасности имеют различную природу происхождения, механизм и специфику воздействия на человека, оборудование и природную среду, а также потенциальные масштабы распространения в окружающем пространстве. В этой связи необходимым этапом анализа является проведение идентификации характерных (специфических) опасностей объектов химической технологии даны в таблице 1.

Идентификация потенциальных опасностей позволяет перейти к составлению общего перечня возможных на объекте аварий, к их анализу и систематизации, и далее к разработке характерных сценариев их возникновения и физически обоснованных вариантов развития ("исходов"). Следует подчеркнуть, что с учетом конкретного влияния внешних факторов каждая отдельная авария может иметь несколько различных исходов.

Переход от качественного описания механизмов возникновения и развития аварий на базе причинно-следственной логики к анализу количественных закономерностей физических эффектов осуществляется с использованием соответствующего комплекса математических моделей. При этом весьма важным является выделение характерных особенностей, определение интенсивностей, общих количеств и времени выброса опасных веществ или энергии в окружающее пространство, то есть достоверное описание "функции источника" негативного воздействия, причем для всего спектра нежелательных событий.

На дальнейшее количественное и качественное формирование поля опасности вокруг источника (т.е. во всех направлениях полупространства) в большинстве случаев оказывают самое непосредственное влияние параметры окружающей среды, в первую очередь - скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, характеристики грунта, рельеф местности и ряд других. Характерными примерами такого влияния могут служить: интенсивность кипения и парообразования сжиженных газов на поверхности грунта (воды) при разливе или выбросе из сосудов, аппаратов или трубопроводов; протяженный перенос по ветру углеводородных паров и токсичных газов; отклонение пламени от вертикальной оси под действием ветра при диф-

## Возможные опасности, последовательности событий, исходы аварий и последствия

Таблица 1.

Технологические опасности	Иницирующие события	Промежуточные события	Промежуточные события	Исходы аварий
Значительные объемы хранения: - опасных веществ - горючих в-в - нестабильных в-в - коррозионных (едких) в-в - удушающих ОВ - веществ, взрывающихся от удара - высокореактивных в-в - токсичных в-в - инертных газов - горючих пылевидных в-в - пирофорных в-в	Технологические нарушения Отклонения технологических параметров: - давления - температуры - расхода - концентрации - скорости реакции - теплоты реакции - изменение фазы - загрязнение	Факторы, способствующие эскалации аварии: Отказы оборудования: - отказ систем безопасности  Источники зажигания: - печи - факела - печи для прокаливания - эл. выключатели - статические эл.-во - горячие поверхности - сигареты	Факторы, способствующие снижению риска Адекватные реакции систем контроля и управления или операторы: - тревога - срабатывание систем контроля - ручное и автоматич. аварийное отключение - срабат-е пожарных и газовых датчиков  Адекватные реакции систем безопасности: - предохранительных клапанов - систем срабатывания давления - систем изоляции - систем расцепления - резервных систем	Анализ: - выброс - мгновенное и постепенное испарение - дисперсия газа с нейтр. или полож. плавучестью - дисперсия тяжелого газа Пожары: - пожары луж - струевые пламена - BLEVE - вспыхивающие пожары Взрывы: - ограниченные взрывы - взрыв парового облака в свободном пространстве - физические взрывы - пылевые взрывы - детонации - взрыв конденсированной фазы Разлет осколков
Экстремальные физические условия: - высокие температуры - низкие температуры - высокие давления - вакуум - циклические изменения давления - циклические изменения температуры - гидравлические удары	Разгерметизация: - трубопроводов - резервуаров - сосудов - отказ прокладок, сальников  Неисправности оборудования: - насосов - клапанов - измерительных приборов - датчиков - блокировок  Неисправности систем обеспечения: - электрической - подачи азота - водоснабжения - охлаждения - подачи воздуха - теплообмена - вентиляции  Отказ системы административного управления  Ошибки человека: - при проектировании - при строительстве - в процессе эксплуатации - при техобслуживании  Внешние события: - экстрем. погодные условия - землетрясения - воздействие др. аварий - вандализм/диверсии	Отказ системы административного управления  Ошибки человека: - небрежность - неопытность - неправильная диагностика - принятие неправильных решений  Эффекты домино: - разгерметизация др. оборудования - выбросы др. веществ  Внешние условия: - метеорология - видимость	Системы смягчения последствий: - дамбы и дренажные системы - факела - системы противопожарной защиты (активные и пассивные) - взрывная вентиляция - поглощение токсичных веществ  План реагирования на ЧС - sireны/ предупреждения - аварийные мероприятия - защитная экипировка - убежища - эвакуация  Внешние факторы - раннее обнаружение - специально сконструированные сооружения  Обучение  Др. системы административного управления	Последствия Анализ последствий: - токсические воздействия - термические воздействия - воздействия от избыточного давления  Оценка опасностей для: - населения - персонала - окр. среды - имущества - компании

фузионном горении нефтепродуктов и сжиженных газов с открытой поверхности; фотохимические превращения продуктов сгорания или иных веществ, выбрасываемых в атмосферу и др. Следует подчеркнуть, что значительное число возможных метеорологических состояний устойчивости атмосферы (не менее 6-и по Паскуиллу) и большое число возможных направлений и скоростей ветра (по крайней мере 5-7 и больше число возможных направлений и основных географических направлений) резких характерных скоростей и не менее 8-и основных географических направлений) резко увеличивают число вариантов распространения потенциально опасных веществ в атмосфере, требующих анализа. А это, в свою очередь, оказывает непосредственное воздействие на потенциальные масштабы ущерба. Более детально вопрос будет рассмотрен ниже.

Формирование в окружающем пространстве физического поля (потенциальной опасности) может также вообще не зависеть или слабо зависеть от характеристик среды распространения. Например, в случае разрушения сосуда с газом под давлением (воздушная ударная волна, разлет осколков) или при разрушении резервуара со сжиженным газом (образование огневого шара/эффект "BLEVE"/, термическая радиация, ударная волна).

Таким образом математическое моделирование призвано прогнозировать различные варианты и специфику распространения и трансформации исходной потенциальной опасности в окружающем пространстве, обосновывать их общие масштабы и динамику физических процессов.

Переход к оценке и анализу прямых или косвенных (отдаленных) последствий (ущерба) от возникновения и развития аварий требует четкого определения и классификации как самих субъектов воздействия, так и возможных (допустимых) мер воздействия. Заметим, что принятая для конкретного случая мера воздействия служит, по существу, граничным репером при определении масштаба распространения соответствующей потенциальной опасности (в виде поля физических параметров). Как правило, в качестве групп риска выступают люди (технический персонал предприятий, население в зоне потенциального негативного воздействия), материальные ценности (оборудование, объекты инфраструктуры, имущество), биотический компонент природной среды (флора, фауна), а также характеристики водоемов и почв с точки зрения их влияния на жизнедеятельность биоты.

Очевидно, что при комплексном анализе последствий от различного рода аварийных (негативных) воздействий необходимо учитывать как время их действия, так и пространственно-временное распределение субъектов вокруг источника опасности.

Исходные механизмы возникновения аварий и сценарии их последующего развития и воздействия на окружающее пространство весьма неравнозначны, поэтому число формальных вариантов анализа в зависимости от степени детализации может достигать нескольких тысяч. В этой связи крайне важным является обоснование вероятности (частоты) возникновения негативных событий, как фактора предварительного ранжирования их значимости (веса), что позволяет уже на начальных этапах выделить соответствующие приоритеты. По существу, итогом такого анализа должно быть построение некоторой матрицы (множества), отражающей связь между вероятностью события, сценарием (спецификой) формирования "функции источника" и характеристиками поступающей в окружающую среду массы вещества (энергии). Для определения вероятностей исходных событий используются прежде всего соответствующие отраслевые банки статистических данных по характерным отказам авариям. Основная статистическая информация по отказам (авариям) характерного оборудования и объектов газовой промышленности дается в приложении ("Примеры практического анализа..."). При отсутствии статистически значимой информации,

особенно для "редких" событий, а также в качестве дополнительного средства проверки достоверности, определение вероятностей проводят с использованием причинно-следственных закономерностей (логики) возникновения аварийных ситуаций и развития аварий из совокупности промежуточных событий, т.е. на базе разработки соответствующих "сценариев", построенных по физически обоснованному принципу: "А что будет, если...". Поскольку число таких сценариев может быть весьма значительным, а их реализация - взаимозависимой, для интегрального определения вероятности аварии на сложных объектах обычно используются специальные методики построения "деревьев событий" или "деревьев отказов", а также методы "теории графов" и соответствующие программы для ЭВМ. Эти методики широко освещены в специальной литературе (см., например, Э.Хенли, Х.Кумамото "Надежность технических систем и оценка риска". Пер. с англ., М.: Машиностроение, 1984, 528 с) и здесь не рассматриваются.

Важно подчеркнуть, что при этом появляется реальная возможность "синтезировать" (логически предопределить) итоговое "редкое" событие (например, разрушение низкотемпературного изотермического хранилища для сжиженного газа) и с высокой достоверностью вычислить вероятность его возникновения, опираясь на конкретные технические характеристики объекта, регламент его работы, эффективность систем контроля, управления и безопасности и т.п., а также паспортные (или определенные в ходе эксплуатации) показатели надежности отдельных элементов оборудования, по которым, как правило, имеется весьма представительная статистика отказов. В логику возникновения итогового отказа в обязательном порядке включаются и показатели "человеческого фактора".

Таким образом, общим итогом последовательного выполнения вышеперечисленных этапов является построение функциональной связи между величиной определенного ущерба и вероятностью его возникновения. Поскольку численно эти параметры могут сильно различаться (например, аварии с очень малой вероятностью, но очень значимой величиной ущерба и наоборот) для их обоснованного сравнения в рамках единой шкалы используется понятие риска, объединяющее (в виде произведения) вероятность события и его последствия. При получении интегральных значений риски от отдельных аварий или источников рассчитываются независимо, с учетом территориальной привязки источников опасности и групп риска на единой картографической основе и затем суммируются для конкретного субъекта (группы) воздействия.

Резюмируя изложенное, можно утверждать, что понятие риска является универсальной количественной мерой потенциальной опасности, позволяющей:

- провести корректировку исходных целей и стратегии решения задач анализа риска;
- провести сравнение опасностей различной природы и механизмов действия;
- провести классификацию и ранжирование потенциальных источников опасности (технологических объектов) по их вкладу в интегральные показатели риска предприятия, а также анализ пространственно-временного распределения риска по территории вокруг объекта для различных субъектов;
- изучить механизм и исследовать (увидеть "изнутри") причинно-следственную логику возникновения и развития аварий, а также влияние на показатели риска различных факторов технологического, природного и социального характера;
- обеспечить направленное снижение рисков за счет оптимального управления технологическими (техническими) и организационно-методическими факторами воздействия (снижение вероятности, уменьшение величины ущерба) с учетом ограничений по ресурсам.

Как показывает мировой опыт, методология промышленного риска является на сегодня одним из наиболее эффективных инструментов управления безопасностью. В то же время, как следует из изложенного выше, процедура анализа риска в полном объеме представляет собой значительные трудности и требует больших интеллектуальных и технических ресурсов. Следует также учитывать, что не все составные этапы (блоки) анализа риска разработаны на сегодня на одинаковом уровне и имеют различный "стаж" (опыт) использования.

Наиболее широко применяются блоки, связанные с идентификацией опасностей и оценкой последствий физического характера, однако возможности комплексного анализа и принятия адекватных решений при этом ограничены.

Методология анализа риска обладает достаточно гибкой структурой и ее составляющие можно вводить в действие избирательно в различной последовательности, упорядоченной по выбранным приоритетам с учетом исходных целей, а также финансовых и технических возможностей.

Для оптимизации работы в зарубежной практике часто используется понятие "Куба Исследований", с помощью которого отражается связь между глубиной исследований, рабочей "нагрузкой" и целями анализа (рис. 1). Глубина и объем исследований могут варьироваться от простых видов оценки опасности (не более, чем качественного характера, широким гребнем вычищающих все несущественное), до детализированных видов анализа риска, включающих в рассмотрение большое количество разнородных аварий, с использованием высокоточных физических моделей, а также теории вероятностного анализа.

Между этими "крайностями" существует ряд других вариантов проведения анализа, не имеющих четких границ.

Каждая ось Куба (разновидность методики оценки риска; степень детализации и сложности анализа; число аварий, выбранных для анализа) условно разделена на три части, соответствующие различным уровням сложности данного фактора. В результате в принципе мы можем иметь в общей сложности 27 различных вариантов анализа в зависимости от выбранных комбинаций уровней сложности всех трех факторов. При этом следует учитывать, что комплексные усилия, затраченные на анализ при движении в положительном направлении осей возрастают не линейно, а по закону, близкому к факториальному.

Ось "**Методика...**" включает следующие этапы оценки: только последствий аварий; далее - их частоты (т.е. ранжирование частоты возникновения последствий по их значимости) и, наконец, - оценки риска, выстроенные в порядке возрастания возможностей для принятия адекватных решений.

Ось "**Сложность...**" формируется под влиянием детализации как возможных сценариев развития (вариантов исхода) аварий, так и повышения точности анализа физических процессов (в частности, сложности используемых для их описания физико-математических моделей и совершенства технических средств для их реализации).

Ось "**Число аварий...**" построена на следующей классификации аварий по группам:

- локализованная (с масштабами воздействия, ограниченными пределами площади одной установки - "рабочей зоны")
- основная (в отечественной терминологии "максимальная проектная") с потенциальной площадью негативного воздействия в пределах территории предприятия;
- катастрофическая с зоной воздействия, выходящей за пределы "забора" предприятия и захватывающей прилегающие населенные территории.

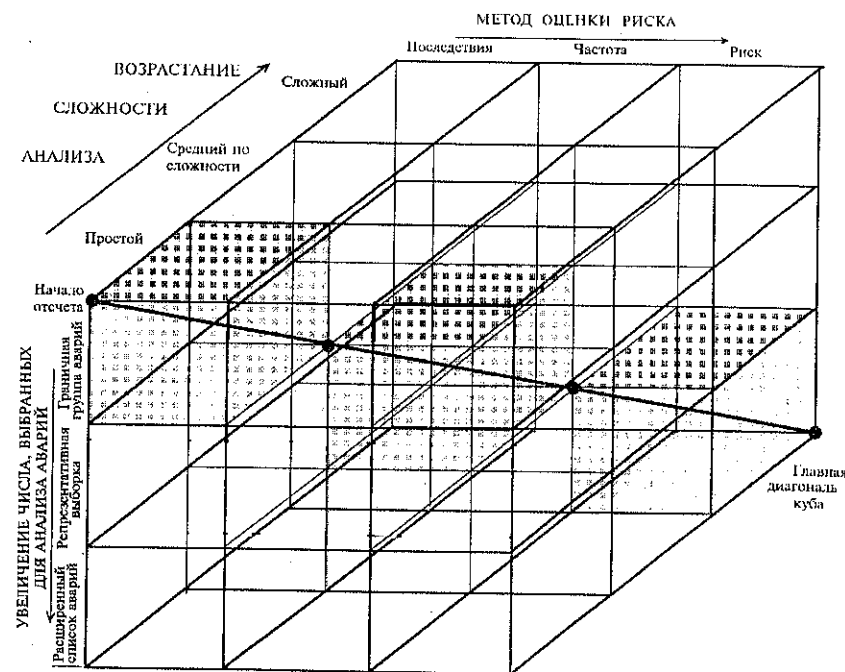


Рис. 1. Куб Исследований

Заметим, что первые две группы аварий характеризуют профессиональный риск (технический персонал, администрация), третья - антропогенный риск (население). В "Граничную (ограниченную) выборку" входит только небольшое число аварий катастрофического типа. При этом расчеты проводятся с целью определения верхней границы последствий прежде всего для населения. Однако, такой подход фокусирует внимание скорее на крайне редких событиях, чем на широком спектре характерных и более частых аварий, на которые, как правило, приходится основная доля риска. "Репрезентативная выборка" должна содержать одну или несколько наиболее характерных аварий из каждого класса и используется при расчете риска для технического персонала. "Расширенный перечень" содержит все возможные (включенные в рассмотрение) аварии из всех трех классов.

Таким образом, "Куб Исследований" принципиально обеспечивает концептуальную основу для дальнейшего обсуждения глубины и построения алгоритма исследований.

В качестве базовой целесообразно принять ось "Методика...", разделение которой на составляющие выделяет три самостоятельные плоскости, в пределах каждой из которых существует девять комбинаций уровней сложности исследований и количества анализируемых аварий. Таким образом, при проведении комплексного анализа существует несколько степеней свободы, которые позволяют достичь поставленной цели при различных комбинациях имеющейся информации и вариантах методической базы.

Следует особо подчеркнуть, что для каждой из 27 возможных ячеек (вариантов) исследований "Куба..." требуется специфический объем и качество информации. Причем требования к информации возрастают по мере движения из начала отсчета вдоль главной диагонали "Куба..."

Поскольку наличие адекватной информационной базы, как правило, напрямую зависит от уровня разработки проекта или срока эксплуатации (опыта работы) предприятия, оптимальная глубина анализа оказывается объективно связанной с этими факторами. В этом плане можно следующим образом качественно охарактеризовать основные ячейки вдоль главной диагонали "Куба..." (табл. 2).

Таблица 2

Показатели	Виды анализа		
	"Простой" анализ	"Средний" анализ	"Сложный" анализ
Сложность исследований	число вариантов "исходов аварий" незначительное	число вариантов "исходов аварий" значительное	число вариантов "исходов аварий" большое
Сложность моделей	минимальная (в основном решение алгебраических уравнений)	средняя (в основном решение обыкновенных диф-х уравнений 1-го порядка)	высокоточные модели (решение систем диф.ур-ний в частных производных - основные законы сохранения массы, импульса, энергии)
Число исследуемых аварий	ограниченная группа	репрезентативная выборка	расширенный перечень
Цель	определить территориальные границы риска	идентификация полного спектра характерных аварий; оценка частоты и ранжирование масштабов последствий	оценка и анализ риска
Ограничения по применению	нет (любая стадия проекта, действующий объект)	только после разработки технологического блока проекта, или для действующих предприятий	только после завершения проекта (или для действующих предприятий) и дополнительной детализации ряда специальных вопросов

И в заключение данного раздела остановимся на некоторых особенностях оценки риска на региональном уровне. Как уже было отмечено выше, при этом нас будут

интересовать только аварии, масштабы которых выходят за пределы предприятия, т.е. аварии катастрофического характера, возможность которых в принципе не исключена на ряде предприятий с химической технологией вследствие, например, экстремальных внешних воздействий (стихийные бедствия, диверсии и т.д.) и/или возникновения каскадных эффектов. Для подобного рода предприятий в обязательном порядке должны быть разработаны планы совместных (согласованных) действий соответствующих служб предприятия и региона (прежде всего по оповещению, защите или эвакуации населения и объектов жизнеобеспечения), основанные на детальной проработке путей распространения и развития характерных аварийных процессов в реальном пространственно-временном масштабе и на базе местных метеорологических характеристик с учетом конкретной привязки к объектам инфраструктуры (транспортные коммуникации, системы связи и т.п.) и располагаемых технических возможностей. Крайне важной является также информационная и психологическая подготовленность и адекватная реакция населения на возникновение чрезвычайных ситуаций, что требует со стороны властей периодического проведения соответствующих организационных мероприятий. При этом следует учитывать также тот факт, что существующие на сегодня допустимые уровни физиологического воздействия (например, токсичных газов) на население в 3-5 раз ниже соответствующих уровней для технического персонала.

При проведении анализа риска на региональном уровне требуют также соответствующего рассмотрения и вопросы уязвимости инфраструктуры со сложной системой функциональных связей, обеспечивающих жизнедеятельность населения и работоспособность промышленности и транспорта. В качестве характерного примера можно привести случай повреждения специальных канализационных систем и связанное с этим попадание токсичных химических веществ в реки и водоемы хозяйственного назначения, аварии на системах газо-, водо- и энергоснабжения и др.

Особое внимание должно быть уделено линейным источникам потенциальной опасности, связанным с перевозкой по железным и автомобильным дорогам сжиженных углеводородных газов (в цистернах под давлением), нефтепродуктов, химических веществ с выраженным токсическим действием (хлор, аммиак), взрывчатых веществ, а также с транспортировкой по трубопроводам природного газа и нестабильного конденсата (сжиженных газов). Следует подчеркнуть, что стационарные промышленные предприятия имеют соответствующее ограждение и охрану территории, штатные системы безопасности и централизованного управления, технический персонал, удовлетворяющий необходимым профессиональным и медицинским требованиям. Они размещаются, кроме того, как правило, за пределами санитарно-защитных зон от населенных пунктов. В отличие от них транспортные коммуникации проходят в основном непосредственно по населенным территориям и жилым зонам городов и поселков, а трассы трубопроводов не имеют не только каких-либо ограждений, но зачастую (для старых трасс) и просто соответствующих указателей. Иначе говоря, транспортные объекты и трубопроводы имеют в большинстве своем свободный доступ как для посторонних людей, так и для технических систем и могут быть подвержены случайному или направленному негативному воздействию внешних сил (акты хулиганства или диверсии на железнодорожном полотне, столкновения поездов с транспортными средствами на переездах, столкновения автомобилей с опасными грузами на шоссе, повреждения трубопроводов землеройной техникой и т.п.). В этой связи на уровне регионального управления должны быть в обязательном порядке и в первую очередь "проиграны" и оценены характерные сценарии и масштабы аварий на транспортных коммуникациях и трубопроводах и обеспечены адекватные действия по снижению потенциального ущерба.

## ГЛАВА II

### РАНЖИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ МАСШТАБАМ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ

Как было отмечено выше, одним из первых этапов анализа риска является вероятностное ранжирование потенциальных источников по ожидаемым масштабам и специфике аварийных выбросов. Для иллюстрации принципиальных особенностей выполнения этого этапа ниже приводятся основные методические подходы анализа, используемые в ряде ведущих западных стран.

Рассматриваются следующие характерные виды деятельности (производства), представляющие потенциальную опасность для окружающей среды:

- производство, переработка и хранение опасных веществ на стационарных установках;

- транспортировка опасных грузов различными видами наземного водного и воздушного транспорта;
- перекачка опасных веществ по трубопроводам.

В качестве основной информативной базы использованы данные из мирового банка по авариям на выделенных видах деятельности. Специальные моменты, связанные с влиянием конкретной региональной и технологической специфики, а также данные по отечественной статистике аварий подробно рассмотрены в "Приложениях по практической оценке риска..".

Для каждого вида деятельности данные по аварийности (авария/год) представлены также в удельных показателях на единицу длины или пути (авария/год/км), на единичную операцию с опасным веществом (авария/операция) или на весь маршрут движения (авария/маршрут). В дальнейшем, имея информацию о количественных характеристиках деятельности (количество поездок, число хранилищ и т.п.), умножением этих характеристик на интенсивность аварийных отказов можно получить значения частот возникновения тех или иных типов аварий.

Каждая аварийная ситуация характеризуется своей динамикой поступления опасных веществ в окружающую среду. Для упрощения ранжирования аварийных ситуаций проводится по максимальным масштабам выбросов.

В качестве характерных примеров ниже представлены количественные показатели аварий и крупных катастроф с опасными веществами (ОВ) в США за период с 1980 по 1984 гг. (табл.3), аварии при транспортировке ОВ (табл.4) и распределение аварий по видам деятельности (табл.5).

### Химические аварии, потребовавшие эвакуации людей

Таблица 3.

Тип аварии	1980/1984гг	в том числе в 1984 г
Сход с рельсов поездов	55	8
Пролив/загорание груза при повреждении цистерн	23	5
Аварии грузовиков	35	5
Пролив/загорание груза при повреждении автоцистерн	32	7
Выброс с химического предприятия	43	5
Выброс с промышленного предприятия	78	24
Трубопроводы	4	0
Морские аварии	4	1
Аварии на свалках отходов	7	1
Другие *	14	1
<b>Всего</b>	<b>295</b>	<b>57</b>

\*) Включают крушения вертолетов и самолетов, случаи с попаданием газа в канализацию, взрывы на нефтяных скважинах, "плавающие" лужи при авариях с хлором, проливы пестицида из упаковок, пожары на шахтах, две аварии с захороненными военными снарядами, две утечки масла из электрического трансформатора. Источник: [1]

### Аварии при транспортировке опасных материалов

Таблица 4.

Тип	Число аварий в год [2,3]	1973-1983 (среднее) [4,6]
Скоростные автотрассы	10000-15000	10289
Железная дорога	1000	975
Воздушный транспорт	200	150
Водный транспорт	20	26

### Крупные аварии с опасными материалами\*

Таблица 5.

Вид деятельности	1964-1973	1953-1973
Химические предприятия	6	12
Хранение и переработка нефти	10	13
Хранилища газа	1	2
Бурение нефтяных скважин	2	2
Трубопроводы	1	1
Пиротехнические предприятия	0	2

Таблица 5. (продолжение)

Вид деятельности	1964-1973	1953-1973
Морские танкеры, баржи	8	15
Железнодорожные цистерны	5	8
Грузовики	3	8
<b>Всего:</b>	36	63

\*10 или более смертельных случаев, 30 или более пострадавших, ущерб \$ 3000000 или более. Источник: [5]

Из представленных данных видно, что только относительно небольшая часть аварий приводит к масштабным последствиям.

Перейдем к анализу конкретных видов деятельности.

### 1. Транспортировка опасных материалов по автодорогам

В общее число аварий при транспортировке ОВ по скоростным трассам включены и аварии с грузовыми цистернами или трейлерами, а также аварии с более специализированными средствами перевозки грузов. При этом необходимо учитывать, что среднее расстояние перевозок в США составляет 28 миль для бензовозов и 260 миль для грузовиков с химическими веществами, а также тот факт, что этим видом транспорта в США перевозится до 60% всех ОВ.

Относительная доля повреждаемости грузов при автомобильных перевозках в зависимости от типа груза (из данных [7] для периода июль 1973 - декабрь 1978 гг):

Легковоспламеняющиеся жидкости	60,5%
Горючие жидкости	16,3%
Коррозионноактивные материалы	11,6%
Воспламеняющиеся сжатые газы	3,2%
Окислители	2,1%
Ядовитые вещества (жидкие или твердые)	2,1%
Невоспламеняющиеся сжатые газы	1,9%
Взрывоопасные вещества	1,5%
Радиоактивные материалы	0,5%
Воспламеняющиеся твердые материалы	0,3%

По общему опыту автомобильных грузовых перевозок опасных материалов средняя степень (частота) аварийности равна  $2 \times 10^{-6}$  аварий/миля (1 миля = 1.609 км).

Более детальная характеристика влияния специфики дорог региона на аварийность может быть сделана на основании информации об авариях при перевозках между штатами, по сельским дорогам или городским магистралям, тоннелям и узким дорогам как функция различных входных переменных и конструкций перевозочных средств [7,8,9,10,11].

Как показывает практика, к выбросам под давлением, проливам или утечкам приводят около 0,50 (50%) аварий, если рассматривать все проливы, включая очень

незначительные, например, из негерметичных клапанов или фланцевых соединений. Если пренебречь последними, как не представляющими серьезной угрозы, то доля значимых утечек составит примерно 0,15-0,20 (15%-20%) случаев аварий. Величина 0,20 (20%) принимается обычно как консервативная.

Основываясь на соответствующих статистических данных, для практического использования предлагаются следующие распределения масштабов утечек:

10% потери груза (условно через отверстие 1") или 1000 галл.	60% случаев
30% потери груза (условно через отверстие 2") или 3000 галл.	20% случаев
100% потери груза (мгновенно) или 10000 галл.	20% случаев
(1" = 2.54 см, 1 галлон = 4.546 л).	

Эти величины охватывают область значительных объемов выбросов. Для упрощения процедуры анализа последствий можно использовать два "репера", считая, что пролив 3000 галлонов случается в 80% случаев аварий, а пролив 10000 галлонов - в 20% случаев.

Отмеченные положения обобщены в таблице 6, а также в так называемом "Рабочем листе", который представляет упрощенный формат для расчета средней годовой вероятности аварий при грузовых перевозках, приводящих к проливам различных количеств веществ.

Дополнительная информация, необходимая для решения этой задачи, включает следующие данные:

- Перевозимый материал;
- Годовое число перевозок;
- Общий объем груза на одну перевозку;
- Общая длина маршрута, в том числе, вблизи населенных пунктов;
- Тип автодороги, по которой осуществляется перевозка (если для них можно применить конкретные степени аварийности, если нет, то принимаются показатели как для скоростной трассы).

Рекомендуемые данные для грузовых перевозок

Таблица 6.

Степень аварийности	$2 \times 10^{-6}$ аварий/милю
Вероятность условного пролива	0.2 для значительных проливов
Распределение (в относительных долях) размеров проливов	0.60 для 10% потери груза (или 1000 галлонов)
	0.20 для 30% потери груза (или 3000 галлонов)
	0.20 для 100% потери груза (или 10000 галлонов)

# **РАБОЧИЙ ЛИСТ 1.** **ОЦЕНКА ЧАСТОТ ВЫБРОСОВ ПРИ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗКАХ**

Опасный материал(ы):	A = _____
Общее число грузовых перевозок:	_____ (только загруженный транспорт)
Длина рассматриваемого маршрута	B = _____ (миль вблизи адм. образований)
Общее число миль в год*	
Частота аварии:	C = A x B _____
Частота пролива:	D = C x 2x10 <sup>-6</sup> _____ аварий/год
Проливы по размерам**:	E = D x 0.2 = _____ проливов/год
10% потери груза (или 1000гал):	E x 0.6 = _____ проливов/год
30% потери груза (или 3000гал):	E x 0.2 = _____ проливов/год
100% потери груза (или 10000 гал):	E x 0.2 = _____ проливов/год

## **Примечания:**

\* Если имеется несколько различных маршрутов с меняющимся количеством перевозок, то необходимо умножить число перевозок на длину пути каждого маршрута отдельно, а затем их просуммировать. Например, 100 перевозок на 15 миль и 50 перевозок на 7 миль дадут (100 x 15) + (50 x 7) = 1850 (общая длина маршрута).

\*\* Пользователь может использовать для целей моделирования и планирования все три сценария или рассматривать только крупные проливы.

Если определен характерный размер отверстия и известны тип грузового резервуара и его геометрические размеры, то рекомендуется использовать при анализе не общий объем, а соответствующую интенсивность истечения и продолжительность выброса, чтобы получить более достоверную оценку последствий аварии. Это особенно важно в случае истечений сжатого газа, сжиженного углеводородного газа или других высоколетучих (кипящих) веществ.

## **2. Транспортировка опасных материалов железнодорожным транспортом.**

На примере анализа статистики США, по железным дорогам перевозится ежегодно около 80 миллионов тонн опасных материалов [4]. Большинство из этих перевозок осуществляется в простых одностенных резервуарах, стационарно закрепленных (смонтированных) на железнодорожных платформах. Исключение составляют так называемые многорезервуарные платформы (на каждой, обычно, до десяти контейнеров), бесшовные металлические резервуары-баллоны (для работы при высоких давлениях), и резервуары с перегородками, в которых каждое отделение рассматривается как отдельный грузовой отсек (резервуар). Их вместимость может колебаться от нескольких сот галлонов до 45000 галлонов. Однако, начиная с 1970 года, вместимость новых резервуаров была ограничена величиной 34500 галлонами (157 м<sup>3</sup>).

По оценкам специалистов из общего числа грузовых поездов около 35% перевозят опасные материалы. В то же время только 7,5% железнодорожных аварий включают случаи с поездами, перевозящими опасные материалы [12]. Эти данные примерно соответствуют процентному отношению количества цистерн, перевозящих химические и подобные им вещества, сжиженные газы или нефтепродукты, к общему

количеству цистерн, использующихся ежегодно [13].

Укрупненные оценки об авариях с различными веществами на тонну перевозимого груза можно сделать на основании данных [6]:

Легковоспламеняющиеся жидкости	26%
Коррозионноактивные материалы	25%
Горючие жидкости/не воспламеняющиеся сжатые газы	22%
Воспламеняющиеся сжатые газы	12%
Ядовитые вещества класса В	3%
Ядовитые вещества класса А	0.1%
Радиоактивные материалы	0.03%

Как показывает анализ, наиболее вероятны аварии на участках маневрирования [14]. При этих операциях выходит из строя до 15% подвижного состава. Например, в 1977 г из общего потока аварий на участках маневрирования произошло 36% случаев схода с рельс и 73% случаев столкновений составов [15].

При анализе выбросов опасных материалов наиболее значимой является авария, которая возникает при столкновении составов или сходе вагонов с рельс, так как при этом обычно происходит значительное повреждение корпуса. Однако, существует и второй тип выбросов, связанных с неисправностью или дефектами оборудования. Это обычно утечки из фланцевых соединений, предохранительных клапанов и т.п. Доля таких утечек [16] составляет до 70% от общего числа выбросов.

Как и для грузового автотранспорта, аварии, происходящие при загрузке и разгрузке, относятся к авариям на стационарных установках.

Как показывает практика [17], наиболее часто происходили аварии со следующими опасными веществами:

Сжиженные (сжатые) газы  
Акрилонитрил  
Горючие нефтепродукты  
Хлористый винил  
Аммиак

Этот же источник показывает, что в год происходило около или менее 30 аварий с уровнем ущерба 100 тыс.\$ или более.

Рекомендуемая величина удельной аварийности для ж/д транспорта составляет 3 x 10<sup>-6</sup> на состав-миля (1.9 x 10<sup>-6</sup> на состав-км). Чтобы перевести эту цифру в величину на вагон-миля, предполагается, что при аварии понесут ущерб 0.20 (20%) вагонов [9]. Таким образом, общая степень аварийности составляет 0.2 x 3 x 10<sup>-6</sup> на состав-миля или около 6 x 10<sup>-7</sup> на вагон-миля (3.8 x 10<sup>-7</sup> на вагон-км).

Удельные показатели аварийности для узлов маневрирования обычно принимают равными 1.3 x 10<sup>-5</sup> аварий на состав-миля. Принимая долю поврежденных вагонов в составе, равной 20%, получим вероятность ущерба около 3 x 10<sup>-6</sup> / вагон-миля. По статистическим данным около 0.15 (15%) аварий возникают в результате пролива как на основных путях, так и на участках маневрирования без какой-либо заметной дифференциации.

В отношении распределения объемов проливов при авариях предлагается использовать следующие данные:

3000 галлонов или 10% груза (условно через отверстие 2") -50% случаев  
10000 галлонов или 30% груза (условно через отверстие 2") -20% случаев  
30000 галлонов или 100% груза ("мгновенно") -30% случаев

Большой вес последней категории аварий частично относят к авариям, в которых выброс части содержимого происходит более чем из одного вагона.



В таблице 7 приводятся предлагаемые для использования данные по степеням аварийности и другим необходимым для анализа факторам, а Рабочий лист 2 описывает процедуру определения средней годовой вероятности аварии для проливов различных веществ.

Местная информация, которая необходима для решения этой задачи, включает:

- Рассматриваемый материал;
- Годовое число вагонов;
- Общий объем груза на один вагон;
- Общая длина главного пути, в том числе вблизи населенных пунктов;
- Общая длина путей при маневрировании одного вагона.

#### Рекомендуемые данные по авариям для перевозок железнодорожным транспортом

Таблица 7.

Аварии на главном пути	$6 \times 10^{-7}$ /вагон-милю
Степень аварийности на маневровочных путях	$3 \times 10^{-6}$ /вагон-милю
Распределение (относительная доля) размеров проливов	0.5 для 10% потери груза (или 3000 галлонов) 0.2 для 30% потери груза (или 10000 галлонов) 0.3 для полной потери груза (в среднем, около 30000 галлонов)

Более детальная оценка влияния различных факторов на аварийность зарубежного и отечественного железнодорожного транспорта приведена в практических примерах оценки риска (см.приложение).

#### РАБОЧИЙ ЛИСТ 2.

##### ОЦЕНКА ЧАСТОТ ВЫБРОСОВ ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Опасный материал(ы):	A = _____
Количество вагонов в год ,	(только загруженные вагоны)
Количество вагонов-миль на участках маневрирования:	B = _____
Количество вагонов-миль на главном пути	(миль на поездку вблизи адм. образований) C = _____
Частота аварии:	$D = (A \times B \times 3 \times 10^{-6}) + (A \times C \times 6 \times 10^{-7})$ — аварий/год
Частота пролива	$E = D \times 0.15 =$ _____ проливов/год
Проливы по размерам:	
10% потери груза(2"отв) или 3000 гал:	$E \times 0.5 =$ _____ проливов/год
30% потери груза(2"отв) или 10000 гал	$E \times 0.2 =$ _____ проливов/год
100% потери груза или 30000 гал:	$E \times 0.3 =$ _____ проливов/год

### 3. Транспортировка опасных материалов морскими судами.

Ежегодно в США большая часть опасных материалов ( по данным [4] в 1982 г. около 550 миллионов тонн) перевозится баржами или другими судами по внешним и внутренним водным линиям.

Значительную часть всех перевозок в экспорте и импорте большинства портов составляют сырая нефть, нефтепродукты, химические вещества и сжиженные газы. Нефтепродукты включают спирты, очищенное топливо, растворители и окислители. Типичными химическими продуктами являются серная кислота, бензол , толуол, щелочь, неорганические продукты и удобрения. Наиболее часто перевозимыми сжиженными газами являются пропан и бутан. Иногда водным путем перевозятся также аммиак, хлор, пропилен, бутилен и бутадиен, а также множество других товарных грузов.

В основном морские перевозки проводятся с относительно малой скоростью и сопровождаются целым рядом специальных мер контроля. В силу этого они характеризуются наименьшей степенью аварийности на тонну-милю. Однако, "заключенный" в них большой энергетический потенциал может привести к серьезным последствиям при столкновениях судов друг с другом или с другими объектами. Как и в случаях перевозок другими видами транспорта незначительные по объемам выбросы могут произойти в результате мелких неполадок (прокладки, фланцы, клапаны и др.).

Показатели аварийности и другие факторы, влияющие на масштабы утечек при транспортировке опасных грузов водным транспортом, представлены ниже. Обычно классифицируют:

Столкновения и посадки на мель в озерах, реках и других внутриматериковых водных путях;

Столкновения и посадки на мель в гаванях и заливах;

Столкновения/несчастные случаи с судами в доках и при швартовке .

Для столкновений первого типа предлагается использовать степень аварийности  $10^{-5}$  /на милю передвижения, что включает как относительно низкие показатели аварийности на водных путях с малой скоростью движения, так и более высокие показатели аварийности на полноводных реках, т.е. на интенсивно эксплуатируемых маршрутах. Основываясь на статистических данных Gulf Intercoastal Waterway (ICWW) для наиболее серьезных случаев посадки на мель, которые могут привести к потере герметичности корпуса и к утечкам груза, предлагается использовать вероятность возникновения несчастного случая вследствие аварии, равную  $5 \times 10^{-6}$  /милю.

Вероятность посадки на мель или столкновений в гавани/заливе дается на разовое "прохождение" этой гавани или залива, в то время как вероятность столкновения при швартовке приводится в значениях "на один заход в порт" (при заходе в порт делается два "прохождения" т.е. туда и обратно). Для случаев посадки на мель и столкновений в районе гавани предлагается значение, равное  $10^{-3}$  / на "прохождение", при швартовке судов и заходе их в доки предлагается вероятность аварии, равная  $2 \times 10^{-4}$  на один заход в порт.

Если не оговариваются (или не имеется информации) различия между типами судов и их конструкциями, то можно принять, что в 0.15 (15%) случаев аварий произойдет утечка груза в окружающую среду. Если же уточняется тип корпуса судна, то принимается, что 0.25 (25%) аварий однокорпусных судов приведут к потере груза, а при авариях судов с двойными корпусами и водонепроницаемыми переборками выброс произойдет лишь в 0.05 (5%) случаев.



Рекомендованное распределение объемов разлива:

- 10% потери груза из одного резервуара/отделения - 35% случаев
- 30% потери груза из одного резервуара/отделения - 35% случаев
- Полная потеря груза из одного резервуара/отделения - 30% случаев

В таблице 8 приводятся предлагаемые для использования данные по степеням аварийности и другим необходимым для анализа факторам, а **Рабочий лист 3** описывает процедуру определения средней годовой вероятности аварии с проливами различных количеств веществ. Дополнительная информация включает:

- Исследуемый материал(ы);
- Максимальная вместимость одного резервуара на судне, перевозящем этот материал;
- Общее количество озер, рек или внутрибереговых водных линий в регионе;
- Общее количество проходов судов по маршруту в год;
- Общее количество грузовых танкеров/барж, входящих и выходящих в залив или гавань;
- Общее количество заходов в порт барж/танкеров;
- Общая длина рек в районе;
- Количество барж/танкеров, передвигающихся по речным маршрутам в год.

Когда обобщается количество заходов в порт барж/танкеров или транзиты в гавани, нужно помнить, что в расчет включаются только те из них, которые загружены опасными материалами. Пустые суда могут также давать некоторый риск от пожара или взрыва, но это не так важно, как в случае с загруженными судами. Также заметим, что все приведенные в таблицах данные, не обязательно необходимы для каждой местности. Например, для населенного пункта, расположенного на реке, и не имеющего гавани или залива, необходимо знать только общую длину реки и количество судов, проходящих по реке. В этом случае представляют интерес только столкновения во время передвижения и посадки на речные мели.

#### Рекомендуемые данные для морских перевозок

Таблица 8

Степени аварийности	$10^{-5}$	/милю для столкновений на озерах, реках и внутрибереговых водных путях,
	$5 \times 10^{-6}$	/милю для посадки на мель там же
	$10^{-3}$	/передвижение - для столкновений и посадки на мель в гавани/заливе
	$2 \times 10^{-4}$	/заход в порт - для столкновений при швартовке
Вероятности условного пролива	0.15	не считаясь с видом судна
	0.05	для судов с двумя корпусами и защитой днища
	0.25	для однокорпусных судов
Распределение (в относительных долях) объемов пролива	0.35	для 10% потери из одного резервуара или отделения
	0.35	для 30% потери из одного резервуара или отделения
	0.30	для 100% потери из одного резервуара или отделения

Аварии, вызванные внутренними причинами, например, пожар/взрыв груза, повреждение корпуса или машинного отделения, а также структурные повреждения имеют, как правило, очень малую вероятность возникновения. Поэтому обычно они в анализ не включаются.

#### РАБОЧИЙ ЛИСТ 3.

#### ОЦЕНКА ЧАСТОТ ВЫБРОСОВ ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ МОРСКИМ ТРАНСПОРТОМ

Опасный материал(ы): \_\_\_\_\_

Длина маршрута (реки, озера, море)\*

A = \_\_\_\_\_

(миль вблизи адм. образований)

Годовое число перевозок на маршруте\*

B = \_\_\_\_\_

(только загруженный транспорт)

Годовое количество транзита в гавани/заливе\*

C = \_\_\_\_\_

(только загруженный транспорт)

Годовое число заходов в док\*

D = \_\_\_\_\_

(только загруженный транспорт)

$$\text{Частота аварии: } E = (A \times B \times 1.5 \times 10^{-5}) + (C \times 10^{-3}) + (D \times 2 \times 10^{-4}) = \frac{\quad}{\quad} \text{ (аварий /год)}$$

Частота пролива:

$$F = E \times 0.15 = \frac{\quad}{\quad} \text{ проливов/год (все суда)}$$

$$\text{или } F = E \times 0.25 = \frac{\quad}{\quad} \text{ проливов/год (однокорпусные суда)}$$

$$F = E \times 0.05 = \frac{\quad}{\quad} \text{ проливов/год (двухкорпусные суда) **}$$

Проливы по размерам:

$$10\% \text{ потери груза из одного резервуара или отделения } F \times 0.35 = \frac{\quad}{\quad} \text{ проливов/год}$$

$$30\% \text{ потери груза из одного резервуара или отделения } F \times 0.35 = \frac{\quad}{\quad} \text{ проливов/год}$$

$$100\% \text{ потери груза из одного резервуара или отделения } F \times 0.3 = \frac{\quad}{\quad} \text{ проливов/год}$$

#### Примечания:

\* - если этот параметр необходим;

\*\* - если известно, сколько судов являются однокорпусными и сколько двухкорпусными, то этот рабочий лист может быть составлен отдельно для однокорпусных и для двухкорпусных судов;

Из-за особой природы утечек из морских судов и трудностей в оценке их интенсивности и продолжительности, рекомендуется считать (при отсутствии более конкретной информации или подходов), что все проливы происходят мгновенно.

#### 4. Транспортировка опасных материалов по трубопроводам

По трубопроводам в первую очередь транспортируются нефть и нефтепродукты, а также топливные газы, которые обычно включают природный газ и сжиженный нефтяной газ (LPG). В значительно меньшей степени по трубопроводам также транспортируются сжиженный и газообразный этан, этилен, сжиженный природный газ (LNG), аммиак, оксид углерода, кислый (содержащий сероводород) природный газ и другие химические вещества. Большинство трубопроводов последнего типа связывают ограниченное число поставщиков и потребителей в отличие от многочисленных магистралей по передаче природного газа на большие расстояния. Заметим, что сети газовых линий под низким давлением, проходящие через множество городов и населенных пунктов, не являются предметом настоящего исследования.

Большая часть опасных материалов транспортируется по трубопроводам относительно малых диаметров (до 12-13 дюймов). Рабочее давление в трубопроводах при этом может изменяться в широких пределах (от нескольких атмосфер до 50-75 атмосфер).

Основные повреждения трубопроводов могут происходить в результате:

- Внутренней коррозии (особенно при транспортировке веществ с коррозионно-активными компонентами, например, с сероводородом);
- Внешней коррозии (из-за дефектов в системах антикоррозийной защиты, а также в случаях прохождения трубопровода под электрофицированными железнодорожными путями и т.п.);
- Внешнего механического воздействия (в результате сельскохозяйственной или строительной деятельности);
- Структурных отказов или механических дефектов (в результате развития исходных дефектов основного металла, соединений или сварки);
- Природных катаклизмов (из-за сейсмических явлений, оседания почвы и т.п.);
- Ошибок операторов;
- Ошибок проекта;

Подробная информация об отечественной статистике и факторах влияния на аварийность представлена в практических примерах оценки риска.

Ежегодно в США и Европе представляются данные о тысячах случаев утечек, однако многие из них очень незначительны и, как правило, не имеют выраженных негативных последствий для населения. Например, данные работы [20] показывают следующее количество аварий и смертельных случаев, которые произошли из-за отказов трубопроводов:

Показатели Тип	1984		1983	
	кол-во отказов	кол-во смертей	кол-во отказов	кол-во смертей
Газовые трубопроводы	967	35	1575	12
Жидкостные трубопроводы	188	0	-	6

Основываясь на имеющейся статистической информации, предлагается для трубопроводов с диаметром менее 20" принять степень аварийности, равную  $1.5 \times 10^{-3}$  /миля-год ( $\sim 1 \times 10^{-3}$  /км-год). Для трубопроводов с диаметром больше или равным 20" -соответственно  $5 \times 10^{-4}$  /миля-год ( $\sim 3 \times 10^{-4}$  /км-год).

Для анализа выбросов опасных веществ из трубопроводов предлагаются следующие распределения:

Для жидкостных и газовых трубопроводов выброс при разрушении на полное сечение (гиловитный разрыв) -20% случаев

Для всех трубопроводов с газами или жидкостями 1 час выброса через отверстие 1" - 80% случаев

Эти данные обобщены в табл.9 и используются в **Рабочем листе 4**.

Требуется также информация по:

- исследуемому (транспортируемому) веществу;
- длине трубопровода в районе административных образований;
- диаметру трубопровода;
- скорости потока;
- наличию (или нет) систем обнаружения утечек и отсекающей (управляющей) арматуры.

#### Рекомендуемые данные для транспортировки по трубопроводам

Таблица 9.

Степень аварийности	$1.5 \times 10^{-3}$ / миля-год для диаметров меньше 20" или $5.0 \times 10^{-4}$ /миля-год для трубопроводов с диаметрами большими или равными 20"
Распределение масштабов	- 0.20 для 15 мин истечения потока через отверстие, эквивалентное диаметру трубы (или для 1 часа, если отсутствует система перекрытия аварийного участка) - 0.80 для 1 часа выброса вещества через отверстие 1"

#### РАБОЧИЙ ЛИСТ 4.

##### ОЦЕНКА ЧАСТОТ ВЫБРОСОВ ИЗ ТРУБОПРОВОДОВ

Опасный материал(ы): \_\_\_\_\_

Длина трубопроводов нестандартного диаметра \_\_\_\_\_

Длина трубопроводов с диаметром < 20" \_\_\_\_\_

Длина трубопроводов с диаметром > 20" \_\_\_\_\_

Частота пролива  $D = (A \times 1.5 \times 10^{-3}) + (B \times 1.5 \times 10^{-3}) + (C \times 5 \times 10^{-4}) =$  \_\_\_\_\_ (проливов/год)

Проливы по масштабу:  
1 час выброса через отверстие 1": \_\_\_\_\_ (проливов/год)  
Повреждение на полное сечение \_\_\_\_\_ (проливов/год)

Более детальная оценка частоты аварий и анализ факторов, влияющих на эти показатели, даны в работе [21], а по отечественной статистике – в практических примерах анализа риска эксплуатации для продуктопроводов и газопроводов.

## 5. Переработка опасных материалов на стационарных установках

К установкам, являющимся источником потенциальных рисков, связанных с выбросом опасных материалов, можно отнести: газохимические комплексы, газонефтеперерабатывающие и нефтеочистные заводы, химические заводы, резервуарные парки, наливные терминалы, склады горючих и взрывчатых веществ, промышленные объекты общего назначения.

Вследствие столь широкого спектра потенциальных источников опасности практически не существует точных и качественно проранжированных данных для достоверной оценки показателей аварийности по всем объектам. Достаточно хорошо изученными считаются на сегодня отдельные составляющие и в целом морские терминалы, а также операции по загрузке/разгрузке железнодорожных вагонов (цистерн) и грузового автотранспорта. Данные по объектам химической промышленности и связанных с ней нефтяной, угольной, резиновой промышленности, а также по производствам искусственного волокна и пластмасс освещены в литературе в значительно меньшей степени.

Выбросы из стационарных объектов могут произойти по следующим причинам: разрывы или нарушения герметичности резервуаров, технологических аппаратов или контейнеров; разрывы или нарушения герметичности трубопроводов; выбросы через предохранительные клапаны; выбросы, вызванные пожарами, поломками оборудования, непредумышленными или преднамеренными действиями; выбросы, произошедшие в результате переполнения резервуаров или увеличения давления в них выше предельно допустимых значений, включая неадекватные действия операторов, отказы предохранительных клапанов; выбросы из-за отказов загрузочных устройств или неисправностей в соединительных устройствах и т.п.

Для укрупненной оценки они могут быть сгруппированы по территориально-производственному признаку в три основные категории:

- Производственный процесс;
- Зона перекачки (передачи) груза; терминал по загрузке или разгрузке;
- Хранение в резервуарах.

Характерной отличительной чертой погрузочно-разгрузочных зон (терминалов) является наличие большого числа "временных" соединений и ручных операций и, как следствие, - значительное влияние на возникновение аварий как ошибок операторов, так и отказов стыковочных узлов.

Зоны хранения представляют потенциальную опасность прежде всего вследствие концентрации на ограниченной территории больших объемов горючих и взрывопожароопасных веществ.

Особое внимание с точки зрения "живучести" объекта заслуживают вопросы, связанные с экстремальными внешними воздействиями (природные катаклизмы, акты диверсий или терроризма). При этом транспортные и подходные пути к объекту, линии подачи электроэнергии и воды для тушения пожаров могут быть разрушены, а имеющиеся ресурсы безопасности могут оказаться неадекватными ситуации.

Основываясь на анализе имеющейся статистической информации, а также использовании логических схем возникновения крупных аварий из системы "некрити-

ческих" промежуточных событий (построение "деревьев отказов") ниже представлены характерные вероятности аварий основных технологических элементов.

Резервуар (хранилище) с двойной оболочкой	$10^{-6}$ /резерв. в год
Резервуар (хранилище) с одинарной оболочкой	$10^{-4}$ /резерв. в год
Аппараты под давлением	$10^{-4}$ /сосудов в год
Внутризаводские трубопроводы	$5 \times 10^{-6}$ /м в год
Загрузочные устройства	$10^{-4}$ /операция
	$10^{-2}$ /устр-во в год

Поскольку представленные категории оборудования не охватывают все возможные сценарии аварий, они обычно дополняются некоторыми из наиболее вероятных (типичных) для данного объекта событий, связанных с потенциальной потерей больших объемов материалов. Трубопроводы в предварительном анализе рассматриваются только диаметром более >8" и "длинными" участками (30-50 м), частота погрузочно-разгрузочных операций принимается не менее 10 операций в год.

Типовой "Рабочий лист" и характерные значения отказов элементов стационарных систем даны ниже (табл.10)

### Рекомендуемые данные по авариям для стационарных объектов.

Таблица 10.

Тип объекта	Степень аварийности	Размер утечки
<b>химические заводы</b>		
Резервуары (изотермические хранилища) с двойной оболочкой	$1.0 \times 10^{-6}$ /резерв.-год	90% случаев - выброс содержимого через отверстие 1" до тех пор, пока утечка не будет остановлена; 10% случаев - все содержимое выбрасывается мгновенно
Резервуары (хранилища) с одинарной оболочкой или сосуды под давлением	$1.0 \times 10^{-4}$ /резерв.-год	90% случаев - весь объем выбрасывается мгновенно, 10% случаев - утечка из отверстия 1"
Трубопроводы	$5.0 \times 10^{-6}$ /м-год	90% случаев - выброс содержимого через отверстие 1" в стенке трубопровода до тех пор, пока утечка не будет остановлена; 10% случаев - полный разрыв трубопровода
Шланги, рукава	операцию загрузки или разгрузки $10^{-2}$ / на один шланг-год	полный диаметр шланга до остановки потока

<b>промышленные объекты общего назначения, лаборатории, объекты водоочистки</b>		
Резервуары (хранилища) контейнеры для хранения стабильных жидкостей	$1.0 \times 10^{-4}$ /резерв.-год	90% случаев выброс через отверстие в 1" до момента ликвидации утечки; 10% случаев - мгновенный выброс всего содержимого
Трубопроводы (если длина больше 30 метров)	$5 \times 10^{-6}$ /м-год	90% случаев - выброс содержимого через отверстие 1" в стенке трубопровода до тех пор, пока утечка не будет остановлена; 10% случаев - полный разрыв трубопровода
Загрузочные шланги (если используются более 10 раз/в год)	$10^{-4}$ /на операцию загрузки или разгрузки $10^{-2}$ /шланг-год	100% случаев - выброс через полный диаметр шланга при загрузке/разгрузке до остановки потока
<b>склады и другие объекты хранения</b>		
Контейнеры для хранения (барабаны, цилиндры и т.д.)	$10^{-3}$ /год	90% случаев - потери 10% от общего объема хранимого материала; 10% случаев-потеря 100% от объема хранимого материала (т.е. все контейнеры вместе)

**РАБОЧИЙ ЛИСТ 5.**  
**ОЦЕНКА ЧАСТОТ ВЫБРОСОВ СТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Опасный материал(ы)	_____
Количество аппаратов производственного процесса/хранилищ (резервуаров) с одинарной оболочкой	A= _____
Количество резервуаров (хранилищ) с двойной оболочкой	B= _____
Длина трубопровода	C= _____ (метров)
Годовое количество операций погрузки/разгрузки (или количество шлангов)	D <sub>1</sub> = _____ D <sub>2</sub> = _____

Частоты пролива Аппараты основного процесса/резервуары (хранилища) Резервуары хранилища с двойной оболочкой Трубопроводы Погрузочно/разгрузочные шланги	$E = A \times 10^{-4} = \underline{\hspace{2cm}}$ (проливов/год) $F = B \times 10^{-6} = \underline{\hspace{2cm}}$ (проливов/год) $G = C \times 5 \times 10^{-6} = \underline{\hspace{2cm}}$ (проливов/год) $H = D_1 \times 10^{-4} = \underline{\hspace{2cm}}$ (проливов/год) или $H = D_2 \times 10^{-2} = \underline{\hspace{2cm}}$ (проливов/год)
Объемы утечек Аппараты основного процесса/резервуары (хранилища) под давлением 10% содержимого 100% содержимого Трубопроводы: выброс через отверстие 1"; выброс через полный диаметр в течение времени, необходимого для перекрытия или для опорожнения соответствующего резервуара Погрузочно/разгрузочные шланги: выброс через полный диаметр шланга во время подачи среды в течение времени, необходимого для перекрытия	$E \times 0.1 = \underline{\hspace{2cm}}$ (проливов/год) $(E \times 0.9) + F = \underline{\hspace{2cm}}$ (проливов/год) $G \times 0.9 = \underline{\hspace{2cm}}$ (проливов/год) $G \times 0.1 = \underline{\hspace{2cm}}$ (проливов/год) $H = \underline{\hspace{2cm}}$ (проливов/год)

Если нарушение герметичности системы соединений трубопроводов между сосудами может привести к мгновенной утечке из более, чем одного сосуда, то такой сценарий обязательно должен быть учтен. При необходимости используется соответствующая информация по условиям функционирования каждого из аппаратов в группе, включая регламентное и максимальное количество его содержимого, температуру процесса, давление и т.д. Особое внимание и детальное рассмотрение должно быть проведено для аппаратов с веществами, с которыми возможна спонтанная полимеризация, взрывные или другие опасные реакции.

Отказы загрузочных шлангов обычно возникают при перекачке от транспортного средства и в него. Во многих (но не во всех) случаях скорость утечки эквивалентна скорости перекачки груза по шлангу, хотя действительная скорость утечки может быть несколько выше (особенно в начале). Потенциальная продолжительность утечки должна определяться с учетом наличия систем аварийного перекрытия, наличия специализированных подразделений, и времени, необходимого для прекращения выброса с помощью различных имеющихся в их распоряжении средств. Если точно неизвестна возможность перекрытия утечек, то продолжительность выброса на стационарных системах принимается равной 10 минутам. Очевидно, что общее количество выброса не должно превышать объема резервуара или транспортного средства.

Особое внимание уделяется ситуациям, в которых имеются штатные системы аварийного перекрытия утечек с ручным управлением, но они могут оказаться недоступными в аварийной ситуации. Например, водитель грузового транспорта не всегда может приблизиться к транспортному средству, чтобы повернуть вентиль аварийного перекрытия, поскольку вокруг транспортного средства при аварии может сформироваться зона высокотоксичного или взрывоопасного газа или воспламеняющейся жидкости. При отсутствии необходимой информации рекомендуется принять продолжительность выброса веществ из транспортных средств, равной 5 минутам.

## 6. Транспортировка опасных материалов в упаковках.

По существующим оценкам более 700000 транспортных средств и судов используются в США для перевозки опасных материалов в относительно мелких упаковках [4]. Их емкость (масса) обычно не превышает 500 литров (500 кг). Они могут транспортироваться воздушным, водным, железнодорожным или автомобильным транспортом. По оценкам транспортировка опасных товаров в упаковке составляет 50% от общего грузопотока, перевозимого автомобильным транспортом и 80% от общего объема перевозок для наливного транспорта (ОТА, July 1986). До 8% морских перевозок указанных грузов осуществляется сухогрузами, перевозящими небольшие резервуары или контейнеры.

Информация по грузопотокам подобных перевозок крайне ограничена из-за их большого количества и разнообразия. Как следствие, существует определенный недостаток данных по уровням аварийности или распределении проливов по объемам, которые могут быть приняты за основу.

- Причины выброса из "малых упаковок" включают:
- Неисправность прокладок или отказы соединений, клапанов, заглушек
- Истечение капель из упаковки (во время загрузки/разгрузки или при перевозке)
- Прокалывание упаковки (также во время обработки багажа или при перевозке)
- Неисправность блокировок и связей, что дает возможность упаковкам перемещаться, падать или их разрушение при воздействии или во время аварии с транспортным средством
- Пожары
- Замерзание, попадание влаги или другие атмосферные воздействия

В основе определения последствий аварий с "малыми" упаковками лежит использование базовой информации по общей аварийности для железнодорожного,

морского или скоростного автомобильного транспорта с учетом соответствующих долей аварий, приводящих к проливу или утечке.

На первом этапе оценки распределения по размерам пролива можно принять, что потеря одного контейнера (или группы контейнеров) в одной упаковке происходит в 90% случаев, а полная потеря груза (все контейнеры) - 10% случаев.

При необходимости более точной оценки, может быть полезна одна из более детальных методологий [26,27].

При анализе последствий при авариях с опасными материалами, транспортируемыми в отдельных упаковках, обычно считается, что весь объем упаковки выбрасывается в окружающую среду мгновенно.

## 7. Транспортировка опасных материалов воздушным транспортом.

Транспортировка опасных материалов воздушным транспортом в основном ограничена небольшими упаковками.

Транспортируемые воздушным транспортом материалы относятся обычно либо к дорогостоящим, либо к требующим скорой доставки. Годовой тоннаж перевозимых таким образом грузов составляет в США от 200 до 300 тысяч тонн при весьма большом количестве перевозок. В одном из исследований [4] показано, что при страховой оценке упаковок грузов, проведенной в 39 крупных аэропортах, около 5% представляли грузы опасных материалов.

Из статистики известно лишь относительно небольшое количество аварий при перевозке опасных материалов воздушным транспортом. Так в [28] говорится только о 6-ти авариях в 1984 году, которые привели к смерти, нанесению повреждений или ущербу более, чем 25000 \$. Аварии возникают, в основном, вблизи аэропортов, что и представляет по существу предмет исследования при анализе риска.

Существуют многочисленные правила, охватывающие транспортировку опасных товаров воздушным транспортом, включая количественные ограничения и детальное регламентирование упаковки. Как было установлено, многие произошедшие аварии имели место при отклонении от этих правил.

Для целей планирования опасных ситуаций имеется ограниченный объем материала, который мог бы быть применен для точного определения потенциальной уязвимости населения по этому типу аварий. По общему признанию неизвестно, должно ли планирование делаться вне развития коммуникационных связей объектов аэропорта, которые ведут обработку опасных материалов, или идентифицировать те участки, где опасные материалы могут находиться в ведении аэропорта.

Обычно более детально рассматриваются самолеты для уничтожения сорняков с помощью пестицидов. Хотя уровень аварийности таких самолетов и специфические последствия аварий не могут быть идентифицированы точно, наличие большой потенциальной опасности при крушении делает эту проблему весьма актуальной. Сам район крушения и прилегающие местности могут подвергнуться сильному химическому загрязнению. Крушение вблизи водоемов может вызвать угрозу для потребителей воды или ущерб для окружающей среды.

Выше представлена методология оценки годовой вероятности выбросов опасных материалов из стационарных объектов и транспортных систем. Отдельные Рабочие листы для грузового, железнодорожного, морского транспорта, систем трубопроводов и стационарных объектов могут в значительной мере облегчить проце-

дуру вычисления годовой вероятности аварий с выбросами различного количества вещества. Если даже вероятность аварии не рассчитана, Рабочий лист и соответствующий текстовый материал может быть полезным при идентификации и уточнении конкретного сценария аварии.

Наибольшие трудности, как правило, представляет сбор достоверной региональной информации, необходимой для составления Рабочего листа: число и протяженность перевозок, количество и объем резервуаров или производственных аппаратов, и т.д. Заметим, что более обширная информация или очень точный расчет не всегда являются оправданными. Если региональная информация недостаточна или непригодна, то необходимо проводить экспертные оценки с использованием информации из других компетентных источников.

## ЛИТЕРАТУРА.

1. *Sorensen, J.H.* "Evacuations Due to Chemical Accidents: Experience from 1980 to 1984", prepared by Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-9882, January 1986.
2. Materials Transportation Bureau. "Annual Report on Hazardous Materials Transportation, Calendar Year 1983.
3. *Cheok M.C., G.D. Kaiser and G.W. Parry.* "Development of Methodology for Comprehensive Hazard Analysis - A Feasibility Study", prepared by NUS Corp. for the Federal Emergency Management Agency, June 1985.
4. Office of Technology Assessment. "Transportation of Hazardous Materials": State and Local Activities", OTA-SET-301, Washington, DC: U.S. Government Printing Office, March 1986.
5. Office of Radiation Programmes. "The Consequences and Frequency of Selected Man-Originated Accident Events", U.S. Environmental Protection Agency, NTIS PB80-211303, June 1980.
6. Office of Technology Assessment. "Transportation of Hazardous Materials", OTA-SET-340, Washington, DC: U.S. Government Printing Office, July 1986.
7. *Urbanek, G.L. and E.J. Barber.* "Development of Criteria to Designate Routes for Transporting Hazardous Materials", prepared by Peat, Marwick, Mitchell and Co. for the Federal Highway Administration, NTIS PB81-164725, September 1980.
8. National Transportation Safety Board. "Railroad / Highway Grade Crossing Accidents Involving Trucks Transportation Bulk Hazardous Materials", NTIS PB-82-113432, September 1981.
9. *Smith, R.N. and E.L. Wilmut.* "Truck Accident and Fatality Rates Calculated from California Highway Accident Statistics for 1980 and 1981", prepared by Sandia National Laboratories for U.S. Department of Energy, SAND-82-7066, November 1982.
10. *Considine, M.* "Risk Assessment of the Transportation of Hazardous Substances Through Road Tunnels", Recent Advances in Hazardous Materials Transportation Research, An International Exchange, State-of-the-Art Report 3, Transportation Research Board, Washington, DC, 1986, pp.178-185
11. *Clarke, R.K. et al.* "Severities of Transportation Accidents", Sanda Laboratories, NTIS SLA-74-0001, July 1976.
12. *von Herberg, P.* "Prevention is the Best Cure", Chemical Purchasing, September 1979, pp. 79-84.

13. Association of American Railroads. "Railroad Fact, 1985 Edition", August 1985.
14. Chemical and Engineering News. "Emergency plants urged for railyard chemicals." July 29, 1985, p.6.
15. *Nayak, P.R., D.B. Rosenfield and Hagopian.* "Event Probabilities and Impact Zones for Hazardous Materials Accidents on Railroads", prepared by Arthur D. Little, Inc. for the Federal Railroad Administration, DOT/FRA/ORD-83/20, November 1983.
16. *Harvey, A.E., P.C. Conlon and T.S. Glickman,* "Statistical Trends in Railroad Hazardous Materials Transportation Safety -1978 to 1986", Publication R-640, Association of American Railroads, Washington Systems Center, September 1987.
17. *Wolf, K.E.* "An Examination of Risk Costs Associated with the Movement of Hazardous Materials", submitted to the Transportation Research Forum's 26th Annual Proceedings, October 22-24, 1984.
18. *Lautkaski, R., T.Mankamo and M.Karkkainen.* "Chlorine Transportation Risk Assessment", Revised Edition, Nuclear Engineering Laboratory, Report 27, Technical Research Centre of Finland, September 1979.
19. Federal Railroad Administration. "Accident/Incident Bulletin, No.156, Calendar Year 1987", July 1988
20. Transportation Systems Center. "Transportation Safety Information Report, 1984 Annual Summary", U.S. Department of Transportation, DOT-TSC-RSPA-85-1, April 1985.
21. Technica. "Ethane and Ethylene Pipelines Between Mossmorran and Grangemouth, Assessment of Residual Risk", Production No.9, London, January 1983.
22. *Atherton, J.G. et al.* "The Bulk Storage and Handling of Flammable Gases and Liquids," London: Oyez Publishing Limited, 1980.
23. Concawe. "Methodologies for Hazard Analysis and Risk Assessment in the Petroleum Refining and Storage Industry," CONCAWE Report No 10/82, Den Haag, December 1982.
24. COVO Steering Committee. Risk Analysis of Six Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijnmond Area, a Pilot Study, Boston: D.Reidel Publishing Co., 1982
25. *Simmons, J.A.* "Risk Assessment of Storage and Transport of Liquid Natural Gas and LP-Gas", prepared by Science Applications, Inc. for the U.S. Environmental Protection Agency, NTIS PB-247 415, November 1974.
26. *Kloeber, G. et al.* "Risk Assessment of Air Versus Other Transportation Modes for Explosive and Flammable Cryogenic Liquids, Volume 1: Risk Assessment Method and Results", prepared by ORI, Inc. for Materials Transportation Bureau, NTISPB80-138472, Desember 1979.
27. ICF, Inc. "Assessing the Releases and Costs Associated with Truck Transport of Hazardous Wastes", prepared for the U.S. Environmental Protection Agency, NTIS PB84-224468, 1984.
28. Hazardous Materials Intelligence Report, May 31, 1985.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ В ОКРУЖАЮЩЕМ ПРОСТРАНСТВЕ

Как уже отмечалось, этапы, связанные с обоснованной идентификацией и анализом физических особенностей развития аварийных процессов, с достоверным прогнозом динамики и времени действия потенциальной опасности, а также с расчетом зон (масштабов) распространения характерных поражающих факторов в окружающем пространстве, являются одними из важнейших в общем алгоритме проведения комплекса исследований по оценке показателей риска.

Важно подчеркнуть, что глубина физических исследований и сложность используемого математического аппарата носят подчиненный характер и в общем случае должны быть адекватными поставленным целям в рамках общей проблематики анализа риска.

К настоящему времени за рубежом разработан ряд комплексных методик для упрощенного расчета и инженерного анализа большого числа гидро-газодинамических и тепло-массообменных процессов, связанных с авариями на объектах химической технологии (схематичное представление ряда характерных аварий дано на рис.2,3). Среди наиболее широко используемых, в том числе и у нас в стране, можно указать методики:

1.Method for the calculation of physical effects. CPR 14 E. TNO - The Netherlands Organization of Applied Scientific Research. "Yeloow book" - Voorburg, November 1988;

2.Handbook of chemical hazard analysis procedures U.S.Department of Transportation, March,1992.

Следует особо отметить тот факт, что при проведении инженерного анализа в силу определенной ограниченности инструментальной базы далеко не всегда удается построить обоснованный сценарий развития сложных аварий и обеспечить достоверный прогноз зон их негативного физического воздействия на окружающую среду.

Серьезные опасения вызывает также то обстоятельство, что целым рядом отечественных организаций используются пакеты прикладных программ для ПЭВМ, полученные, как правило, неофициальным путем, без детального математического описания исходных моделей и соответственно без гарантий фирм-разработчиков.

В силу указанных причин необоснованные упрощения и некорректное использование моделей зачастую могут привести к совершенно неадекватному описанию аварийных процессов и грубым искажениям масштабов их воздействия на окружающую среду.

В этой связи в настоящей работе сделан акцент прежде всего на детальном анализе физических особенностей развития и потенциальных масштабов распространения аварийных процессов, наиболее характерных для газовой отрасли. В качестве инструмента для анализа при этом использовались либо оригинальные физико-математические и программные разработки ВНИИГАЗ'а, всесторонне аттесто-

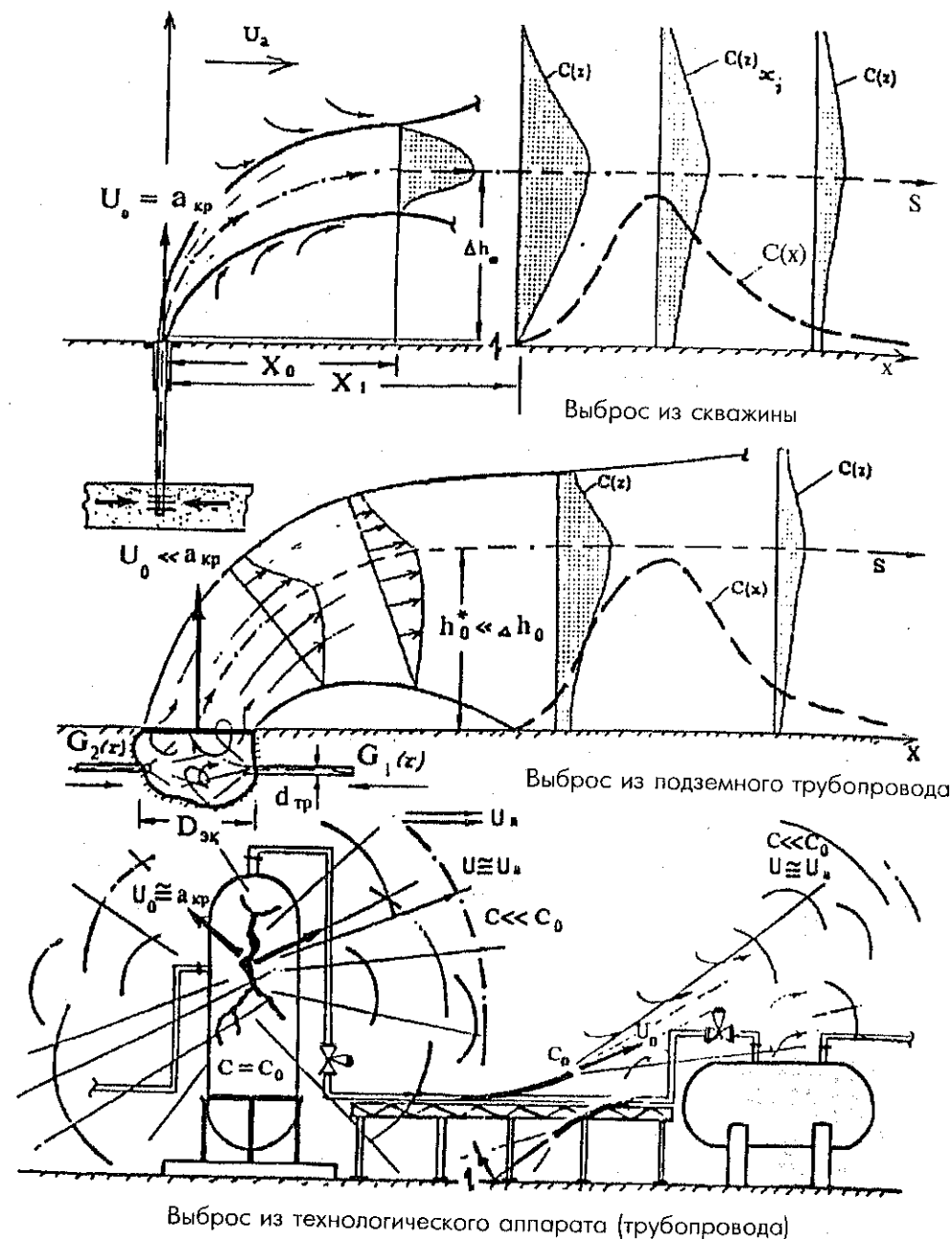
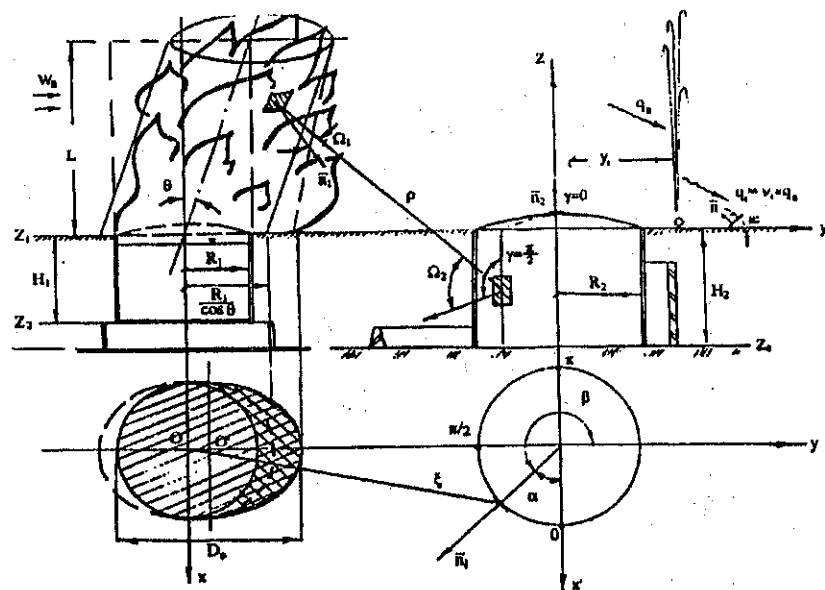


Рис. 2. Схематическое представление характерных аварий на объектах химической технологии.



Пожар в резервуарном парке

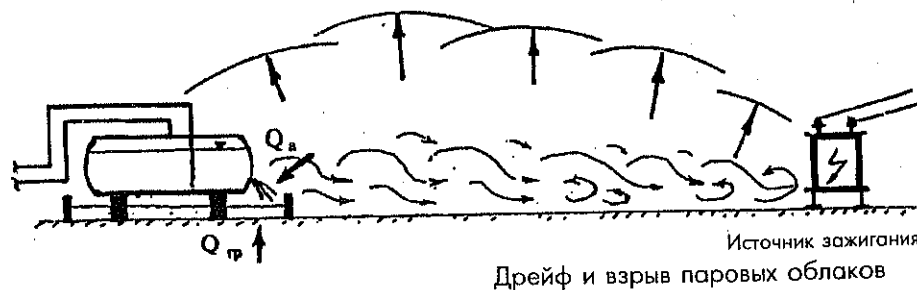
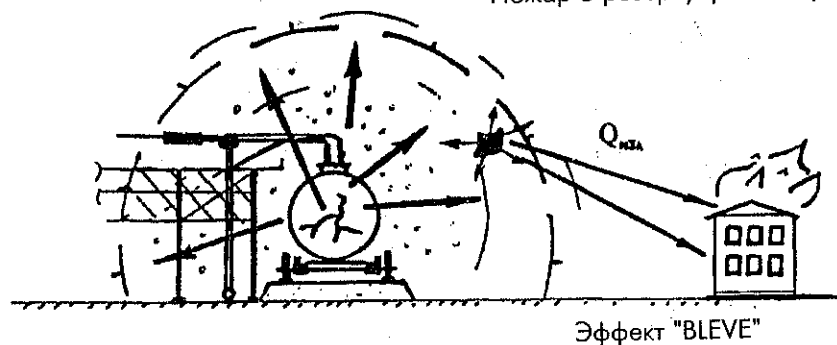


Рис. 3. Схематическое представление характерных аварий на объектах химической технологии.

ванные по результатам соответствующих промышленных экспериментов, либо разработки наиболее авторитетных в области топливной энергетики западных фирм (Американская Газовая Ассоциация; Шелл; Бритиш Газ; Ливерморская национальная лаборатория; Газовый технологический университет; Американское общество инженеров-химиков и ряд других).

Следует заметить, что представленные в данном руководстве модели не претендуют на роль единственных практических рекомендаций, а используются только как инструмент для обоснования физических особенностей и характерных масштабов аварийных процессов.

Для лучшего понимания математические модели условно разделяются на модели аварийных процессов в системах сжатого природного газа и модели в системах сжатого углеводородного газа.

### 3.1 МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ НА ОБЪЕКТАХ СЖАТОГО ГАЗА

#### Истечение газа из скважины \*

Аварийная ситуация обычно отождествляется с неуправляемым выбросом в атмосферу, в котором можно выделить три элемента: источник (природное или техногенное скопление флюида в глубинном пласте), канал (участок ствола, обсадные, буровые или насосно-компрессорные трубы), выходной участок (выходное сечение колонны или отвода, устьевое оборудование, кратер).

Продолжительность фонтанирования зависит от геологотехнологических условий и эффективности мер по ликвидации аварии. Так незначительные по объему техногенные или природные скопления истощаются довольно быстро (порядка нескольких часов или суток). В то же время фонтанирование из сеноманской залежи месторождений севера Тюменской области и Ямала может продолжаться многие месяцы (и даже годы) практически без снижения дебита. Для плотных коллекторов дебит может заметно уменьшаться в процессе фонтанирования даже при наличии больших запасов. Неоднозначно влияет фонтан на состояние призабойной зоны. Мощный поток может привести к очистке поровых каналов, выносу породы, которая может забить участки ствола и сформировать пробку. Определенное значение имеют также особенности вскрываемого разреза: устойчивость стенок, наличие солей, многолетнемерзлых пород и т.д. Учитывая сказанное, при оценке продолжительности фонтанирования в настоящее время наиболее целесообразно использовать статистические данные для конкретных регионов.

Для оценки среднего дебита можно воспользоваться методами гидрогазодинамического расчета скважин, внеся в них необходимые коррективы. Приток флюида к забою описывается обычными уравнениями фильтрации:

\*1 раздел подготовлен Е.В. Шеберстовым



$$Q = (P_{пл} - P_3) \cdot \frac{Q_0(x, y)}{\ln(R_K / R_c)} \quad (3.1)$$

$$Q_0 = \frac{2\pi K H}{\mu}; R_K = R_c + 2\sqrt{\chi \tau}$$

$$\chi = \frac{P_{пл} \cdot K}{m \cdot \mu} \quad \text{— (для газового пласта),}$$

где  $P_{пл}$ ,  $K$ ,  $H$  - пластовые давления, проницаемость, эффективная толщина пласта в месте расположения скважины;  $\mu$  - вязкость флюида, вычисляемые при среднем давлении в призабойной зоне;  $P_3$  - давление на забое;  $R_c$  - радиус скважины;  $\chi$  - пьезопроводность;  $m$  - пористость;  $\tau$  - время.

Если фонтан произошел во время бурения при вскрытии пласта, то течение вблизи от скважины не будет плоско-радиальным и приведенная формула даст несколько завышенные значения дебита.

Канал, по которому движется неуправляемый поток, можно разбить на участки приблизительно постоянных (по длине) поперечных размеров. В большинстве задач течение в скважине можно считать квазиустановившимся. В этом случае уравнения сохранения массы и импульса приобретают следующий вид:

$$\rho \cdot FW = \rho_n Q_n = \text{const}$$

$$\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{\partial(\rho W^2)}{\partial Z} + gP \left[ 1 + \left( \frac{W}{W_r} \right)^2 \right] = 0 \quad (3.2)$$

$$W_r = \sqrt{\frac{2gD}{\lambda}}, \quad P = \rho \bar{Z} R^* T,$$

где  $Z$  - осевая координата;  $W$  - скорость;  $g$  - ускорение силы тяжести;  $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления;  $D$  и  $F$  диаметр и площадь поперечного сечения канала;  $\bar{Z}$  - коэффициент сжимаемости;  $R^*$  - газовая постоянная;  $\rho$  - плотность;  $T$  - температура.

Вместо уравнения энергии в настоящей методике принято предположение о баротропности течения в скважине. Это означает, что плотность флюида считается однозначной функцией давления. Для оценки точности этого допущения были рассмотрены два крайних случая - изотермическое и адиабатическое течения газа. Расчеты показали, что для оценочных целей допустимо использовать изотермическую модель.

Одной из особенностей рассматриваемых задач является достижение критических условий истечения в выходном сечении, через которое газ попадает в атмосферу. При этом скорость потока в сечении равна местной скорости звука ( $W_{сб}$ ), а дебит для изотермического истечения вычисляется по формуле:

$$Q_n = C_y \cdot W_{сб} \cdot F_y \cdot \frac{\rho_y}{\rho_n}$$

где  $C_y$  - поправочный коэффициент, учитывающий специфику формирования конфигурации выходного сечения канала при аварии; индекс "y" означает условия на устье скважины; "n" - нормальные условия.

Объединяя системы уравнений (3.1) и (3.2), описывающие квазистационарное течение по элементам, получим краевую задачу для определения дебита открытого фонтана в произвольный момент времени в системе "пласт-ствол".

Волны конечных возмущений распространяются в скважине со скоростью нескольких десятков метров в секунду, следовательно время смены стационарных режимов в скважине длиной, например, 4000 м составит две-четыре минуты. Таким образом, предложенная методика справедлива для оценки негативных воздействий, связанных с истечениями в атмосферу, длительность которых составляет несколько десятков минут или несколько часов. Необходимость оценки объемов, выброшенных за более короткий период, возникает при наличии в продукции скважин токсичных компонентов. В этом случае предусматривают специальные меры защиты. Так на месторождениях, содержащих сероводород, требуется порядка 10 - 30 минут для поджога газа на любой эксплуатационной или бурящейся скважине. Для подобных аварий ущерб должен оцениваться по объему "залпового" выброса. Залповый выброс может произойти при быстром устранении препятствия, перекрывающего устье заполненной газом скважины. Условно, начиная с этого момента, по скважине к забою начнет передвигаться волна разрежения. Расчет такого нестационарного процесса можно выполнить численно, например, методом характеристик [1]. Однако, учитывая оценочный характер настоящей методики, для анализа большого числа вариантов, соответствующих различным конструкциям скважин, предлагается рассчитывать залповый выброс методом смены стационарных состояний. Предполагается, что при движении волны разрежения в скважине существует два участка. На нижнем находится покоящийся столб газа, а на верхнем газ движется квазистационарно под действием перепада давлений между границей участков и атмосферой. При этом учитывается возможность критического истечения. После того, как волна разрежения достигла забоя, процесс фонтанирования рассчитывается по вышеприведенной методике с учетом увеличивающейся депрессионной воронки в пласте.

Необходимость модификации методики возникает при рассмотрении газоконденсатных и нефтегазовых месторождений. Рассмотрим первый из этих случаев. В процессе движения флюида от забоя к устью давление и температура значительно снижаются. Вследствие изменения термобарических условий увеличивается доля жидкой фазы в потоке и изменяется гидродинамический режим течения (пузырьковый, кольцевой, дисперсный и т.п.). Современные методики термогидродинамического расчета газоконденсатных и нефтегазовых скважин [2] основаны на системе уравнений сохранения массы, количества движения, энергии. Принципиальная сложность практического применения этих моделей связана с неопределенностью исходной информации о компонентном составе смеси. Наличие в продукции скважины неучтенных компонент, в частности пластовой воды, может существенно повлиять на фазовое поведение системы и заметно снизить точность гидродинамического расчета.

Учитывая сказанное, нами предлагается использовать приближенный подход, основанный на модели гомогенного потока, которая хорошо описывает турбулентное движение смесей с высокими скоростями. Кроме того течение предполагается баротропным. В результате для движения по стволу принимается модель, аналогичная приведенной выше. Предположение о гомогенности потока позволяет использовать для определения зависимости плотности от давления данные о контактной конденсации.

Точность предлагаемого подхода проверена сопоставительными расчетами по Карачаганакскому ГКМ, газ которого содержит значительное количество фракции  $C_{5+}$ . Зависимость плотности от давления при контактной конденсации определена с по-

мощью методики расчета фазового равновесия с использованием уравнения Пенга - Робинсона. Полученные зависимости близки к линейным, по крайней мере для диапазона давлений в стволе (аналогичный вывод справедлив и для смеси Астраханского ГКМ). Благодаря этому обстоятельству приведенные выше методики очевидным образом обобщаются на рассматриваемые смеси. Результаты сопоставительных расчетов для Карачаганакского ГКМ приведены в таблицах 11 и 12. Как видно, точность вполне приемлема для целей настоящей работы.

Погрешность однородной модели в сторону завышения дебита возрастает при переходе к нефтяным скважинам, в продукции которых содержится растворимый газ. В этом случае необходимы коррективы, учитывающие проскальзывание фаз.

**Сопоставление свободных дебитов и давлений на срезе скважин КГКМ, рассчитанных по методикам: ГАНГ / 2 /, ВНИИГАЗ / 1 / (фонтанирование по НКТ)**

Таблица 11

№ п/п	Номер скважины	Дебит, тыс. м <sup>3</sup> / сутки			Давление на срезе, МПа		
		ГАНГ	ВНИИГАЗ	Отклонение, %	ГАНГ	ВНИИГАЗ	Отклонение, %
1	100	367	357	2.7	0.17	0.2	17.6
2	101	372	381	2.19	0.18	0.2	11
3	105	975	707.5	27	0.8	0.7	12.5
4	107	1416	1076	24	0.67	0.6	10.4
5	109	741	781.9	5.4	0.33	0.4	21
6	118	1324	1071.4	19	0.63	0.6	4.7
7	104	660	603.9	8.5	0.324	0.4	23.4
8	126	2816	1559.5	44	1.091	0.9	17.5
9	625	656	584.9	10.8	0.344	0.4	16.2
10	115	871	616.9	29	0.44	0.4	9
11	152	1087	985.8	9.4	0.56	0.6	7
12	121	1217	1345.3	10	0.68	0.9	32
13	324	880	902.9	2.6	0.46	0.6	30
14	305	613	696.7	13.6	0.334	0.4	16
15	314	916	952	3.9	0.495	0.6	21
Среднее отклонение		14.1			16.6		

**Сопоставление свободных дебитов и давлений на срезе скважин КГКМ, рассчитанных по методикам: ГАНГ / 2 /, ВНИИГАЗ / 1 / (фонтанирование по эксплуатационной колонне)**

Таблица 12

№ п/п	Номер скважины	Дебит, тыс. м <sup>3</sup> / сутки			Давление на срезе, МПа		
		ГАНГ	ВНИИГАЗ	Отклонение, %	ГАНГ	ВНИИГАЗ	Отклонение, %
1	100	400	388	0.5	0.103	0.1	2.9
2	101	421	421	0.	0.105	0.1	4.5
3	105	1871	1607	14	0.348	0.4	15
4	107	3092	2885	7	0.575	0.7	21.7
5	109	1005	1164	16	0.187	0.3	60
6	118	1795	1585.4	11.7	0.335	0.4	19.4
7	104	783	729.9	7	0.151	0.2	32
8	126	8808	6321	28	1.668	1.6	4
9	625	767	697.9	9	0.158	0.2	26
10	115	1514	772.9	49	0.312	0.2	35.8
11	152	1640	1674	2.	0.335	0.4	19.4
12	121	3526	4879	38	0.772	1.2	55
13	324	4124	4469	8.3	0.867	1.1	27
14	305	1647	2010	22	10.338	0.5	47.9
15	314	3409	3822	12	0.714	1.6	40
Среднее отклонение		14.9			27.4		

## ЛИТЕРАТУРА

1. Малеванский В.Д., Шеберстов Е.В. Гидродинамические расчеты режимов глушения фонтанов в нефтяных и газовых скважинах.-М.: Недра, 1990, 247 с.
2. Термодинамическая модель расчета свободного дебита газоконденсатной скважины./Басниев К.С., Розенберг Г.Д., Райский Ю.Д. и др.// М.: ВНИИЭГазпром, 1991, Общ. информ., Сер. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений, 36 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика.- М.: Наука, 1986, 621 с.

## Истечение газа при разрыве трубопровода на полное сечение. \*)

Неизотермический поток сжимаемого флюида применительно к участку газопровода может быть достаточно адекватно описан известными дифференциальными балансовыми соотношениями по массе, импульсу и энергии:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho g) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho g) + \frac{\partial}{\partial x}(P + \rho g^2) &= -\lambda \frac{\rho g^2}{2d_0} \\ \frac{\partial}{\partial \tau} \left[ \rho \left( e + \frac{g^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho g \left( h + \frac{g^2}{2} \right) \right] &= \frac{4\alpha}{d_0} (T_0 - T) \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

где  $\rho$  - плотность газа;  $\tau$  - время;  $g$  - усредненная по сечению скорость транспортируемого газа;  $P$  - давление;  $e, h$  - удельная внутренняя энергия и энтальпия соответственно;  $d_0$  - внутренний диаметр трубы;  $\alpha$  - коэффициент теплообмена с окружающей средой;  $T, T_0$  - температура стенки трубы и окружающей среды.

В качестве уравнения состояния для описания процессов в магистральных газопроводах нами рекомендуется к использованию термодинамическое соотношение Бернולי.

Для решения вышеприведенной системы дифференциальных уравнений со смешанными граничными условиями был использован метод характеристик [1]. Основная идея метода заключается в нахождении характеристических направлений в  $(x)$ -плоскости, вдоль которых исходная система уравнений "вырождается" в систему обычных дифференциальных уравнений первого порядка и решается с помощью стандартной пошаговой конечно-разностной схемы.

В простейшем варианте при автоматическом перекрытии аварийного участка граничные условия формулируются как критическое истечение газа из разрыва на одном конце участка и отсутствие потока массы на другом. Для более реалистичного сценария предполагается, что автоматизированные системы перекрытия не срабатывают и что в течение определенного времени газопровод работает с подключенными компрессорными станциями вверх и вниз от сечения разрыва. Сопряженными граничными условиями при этом являются "напорные характеристики" компрессорных станций. Для более качественного анализа волновых процессов в расчетах разработанного ВНИИГАЗ'ом алгоритма участвуют дополнительно два линейных перегона вверх и вниз по потоку от аварийного перегона.

Переход от дозвуковых скоростей внутри газопровода к звуковому критическому истечению газа в сечении разрыва происходит на расстоянии порядка одного или нескольких десятков характерных линейных размеров, в качестве которого можно принять диаметр трубопровода. Этот участок характеризуется сложным турбулизированным потоком, существенно неоднородным по сечению. Само наличие такого конечного участка и характер течения газа в нем было использовано в [2] при

формулировке граничного условия в сечении разрыва, основанного на вводе дополнительного фиктивного узла, внешнего по отношению к расчетному граничному узлу и отстоящего от него на расстоянии порядка десятка калибров. Расстояние между фиктивным и соседним граничным узлом не входит в расчетные соотношения, а сами значения искомых параметров в фиктивном и граничном узлах на каждом временном шаге связаны следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} P_* &= \left[ \frac{2}{k+1} \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{k}{k-1}} \cdot P_f \\ T_* &= \left[ \frac{2}{k+1} \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right] \cdot T_f \\ \rho_* &= \left[ \frac{2}{k+1} \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{1}{k-1}} \cdot \rho_f \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

где  $k$  - показатель адиабаты,  $M$  - число Маха.

В указанных уравнениях с индексом  $f$  входят значения расхода, давления, температуры и плотности в граничном узле, с индексом  $*$  -соответствующие критические значения в фиктивном узле. При выводе этих уравнений, имеющих газодинамическую природу, использовались в качестве промежуточных параметры торможения.

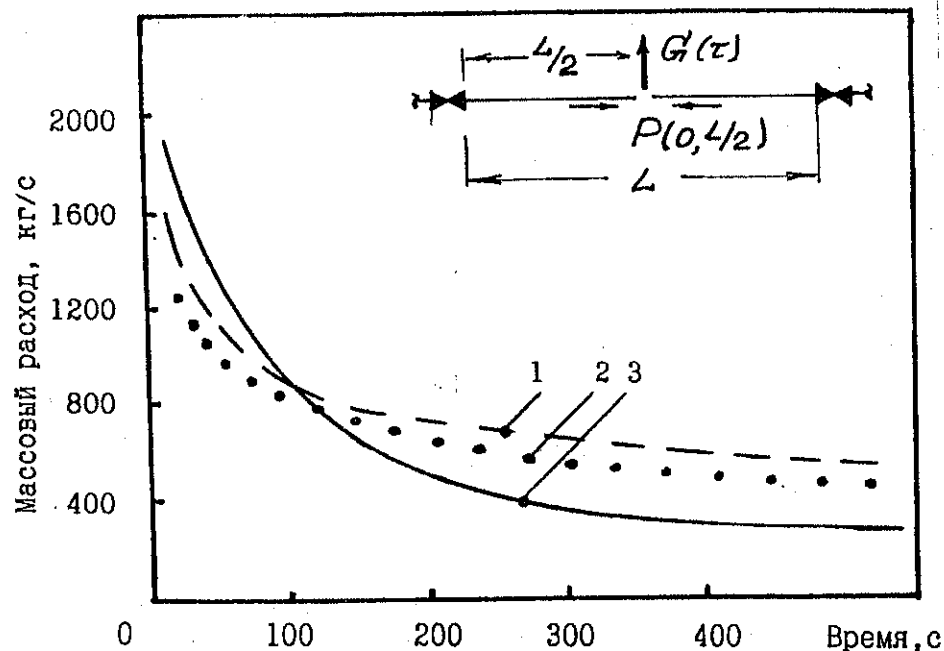
Для проверки точности получаемых численных решений в работе были использованы данные натурного эксперимента, выполненного сотрудниками американской компании Southern GasCo [3]. Эксперимент проводился на промышленном газопроводе длиной 100 миль (~160 км) с внутренним диаметром 30 дюймов. В середине газопровода (в точке разрыва), на расстоянии 10 миль вверх и вниз по потоку, через каждую милю были сооружены наблюдательные площадки, на которых замерялись текущие нестационарные значения давления и расхода газа. На рис. 4 приведено сопоставление замеренных и расчетных значений расхода газа в сечении разрыва. Сравнение свидетельствует о хорошей сходимости расчетных и замеренных параметров процесса истечения больших объемов газа из протяженных газопроводов и подтверждает адекватность модели.

Из анализа экспериментальных и теоретических данных следует также, что для инженерной оценки массового расхода газа при разрыве трубопровода может быть использовано уравнение Белла [4]:

$$G(\tau) = \frac{G_0}{1 + \eta} \cdot \exp \left( -\frac{\tau}{\eta^2 \cdot \varepsilon} \right) + \eta \cdot \exp \left( -\frac{\tau}{\varepsilon} \right) \quad (3.5)$$

где  $G, G_0$  - соответственно текущий и начальный массовый расход (в момент разрыва), кг/сек;  $\tau$  - время, прошедшее с момента разрыва, сек;  $G$  - фактор инерционной задержки ( $\approx 0,5$ );  $\eta$  - коэффициент сохранения массы;  $\varepsilon$  - постоянная времени, сек.

\*) раздел подготовлен совместно с В.А. Сулеймановым



**Рис.4.** Сравнение расчетных (1-ВНИИГАЗ, 3-Белл) и измеренных (2) значений интенсивности истечения природного газа из газопровода  $D_v=30$  дюймов,  $L=100$  миль,  $P(0, L/2)=32$  ат.

Начальный массовый расход рассчитывается в предположении о том, что в месте разрыва характер процесса истечения адиабатический:

$$G_n = \frac{P_n A_p \sqrt{k}}{\sqrt{R Z_{кр} T_n}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$$

где  $P_n$  - давление газа в трубопроводе до разрыва, Па;  $A_p$  - площадь поперечного сечения разрыва,  $m^2$ ;  $R$  - газовая постоянная (Дж/кг·К);  $T_n$  - температура газа в трубопроводе до разрыва, К;  $Z_{кр}$  - коэффициент сжимаемости по условиям газа на срезе (выходе) при  $P_{кр}$ ;  $T_{кр}$ .

Коэффициент сохранения массы рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{M_r}{\varepsilon G_n}$$

где  $M_r$  - общая масса газа, способная вытечь из изолированной секции трубопровода (кг).

Выражение для постоянной времени ( $\varepsilon$ ) базируется на допущении об изотермическом характере процесса движения газа, имеющем место на большей части длины отсеченной секции трубопровода:

$$\varepsilon = \frac{2 L}{3 a_0} \sqrt{\frac{k \cdot f_{тр} \cdot L}{d_0}}; \quad a_0 = \sqrt{k R Z_n T_n}$$

где  $L$  - длина отсеченного участка трубопровода, м;  $a_0$  - скорость звука в газе до разрыва, м/сек;  $f_{тр}$  - коэффициент трения газа о стенки трубы.

Общая масса газа, которая может быть выброшена при разрыве, определяется из выражения:

$$M_r = \frac{L_{эф} A^* d_0}{R Z_n T_n}$$

где  $Z_n$  - коэффициент сжимаемости газа до разрыва при параметрах  $P_n$ ,  $T_n$ ;  $L_{эф} \approx 1,3 \cdot L$  - эффективная длина участка трубопровода, учитывающая дополнительную массу газа, выбрасываемую за время, требующееся для полного закрытия запорной арматуры, м;  $A^*$  - площадь поперечного сечения трубопровода.

Область применения соотношения Белла ограничена случаями истечения газа из отсеченного участка трубопровода. В инженерной практике рекомендуется использовать эту формулу в основном для расчета промышленных сетей, где, как свидетельствуют зарубежные эксперименты, точность расчета по ней значительно повышается по сравнению с точностью расчета для магистральных трубопроводов.

В качестве характерных примеров ниже представлены результаты численного анализа газодинамических процессов на линейном перегоне магистрального газопровода диаметром 1420 x 18,5 мм, длиной 120 км. На рис. 5,6 показана динамика опорожнения отсеченного с одного конца участка одностороннего трубопровода длиной 10 км и 20 км при различных исходных давлениях в трубопроводе (условно начало и конец линейного перегона). На рис. 7 представлено изменение технологических параметров 6-ти ниточного газопровода при разрыве одной из ниток. При этом предполагалось:

- газопровод работает с закрытыми кранами на технологических перемычках;
- на входе и на выходе потока из многоцеховых компрессорных станций все нитки газопровода обвязаны в общие (всасывающий и нагнетательный) коллекторы;
- "напорная" характеристика компрессорной станции (на каждую нитку предусмотрена установка (3+1) шт. компрессоров единичной мощностью 16 Мвт) аппроксимируется функцией вида:

$$(P_n + 1,101)^2 = 2,35 (P_{nc} - 1,203)^2 - 0,0162 Q_k^2$$

где  $P_n$ ,  $P_{nc}$  - абсолютные значения давлений во всасывающем и нагнетательном коллекторах, ата;  $Q_k$  - суточный коммерческий расход, млн.  $m^3$ ; цифры 1,101 и 1,203 - величины гидравлических нормативных потерь, ата;

- идентификация аварийного разрыва проводится по одному из двух характерных условий: либо падение давления в нагнетательном коллекторе компрессорной станции, расположенной вверх по потоку от места разрыва, на 2 ат, либо срабаты-

вание антипомпажной защиты на компрессорной станции, расположенной вниз по потоку от места разрыва, при снижении коммерческой производительности во всасывающем коллекторе на величину  $Q_k/1,1$ .

Из полученных данных следует, что при возникновении разрыва в "начале" линейного перегона быстрее срабатывает первое условие (падение давления нагнетания), а при разрыве ближе к концу перегона - наоборот второе (антипомпажная защита).

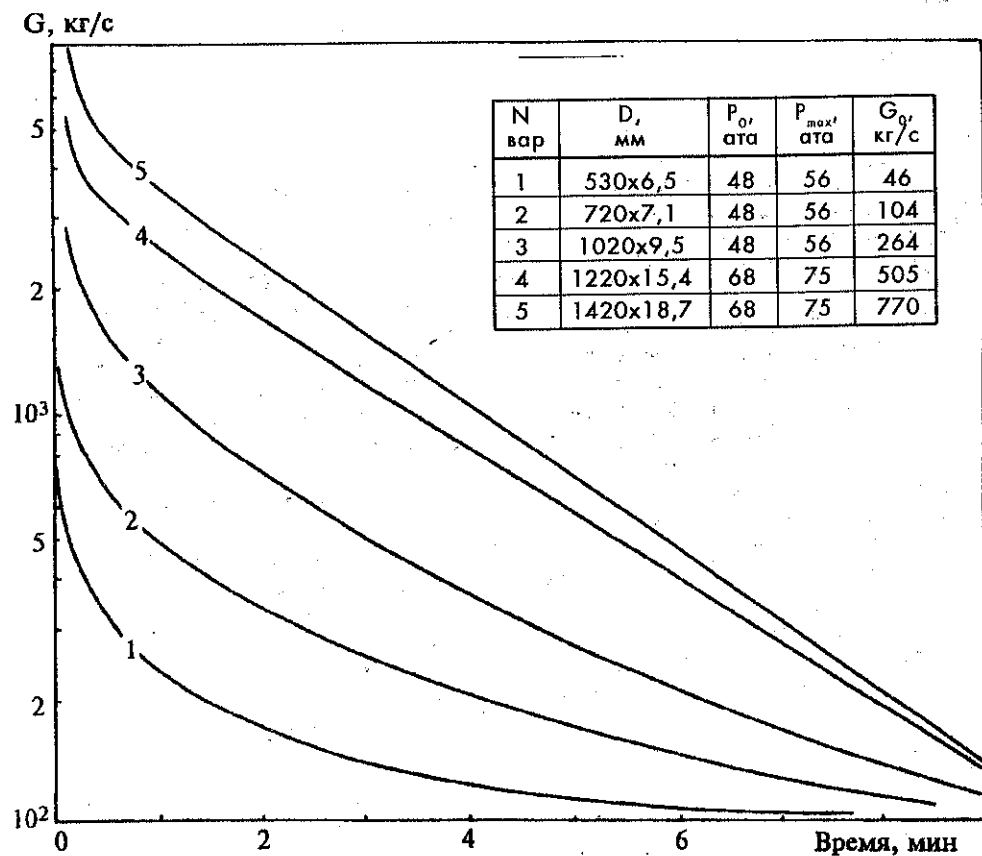


Рис. 5. Влияние технологических параметров на динамику опорожнения отсеченного с одного конца участка газопровода длиной 10 км.

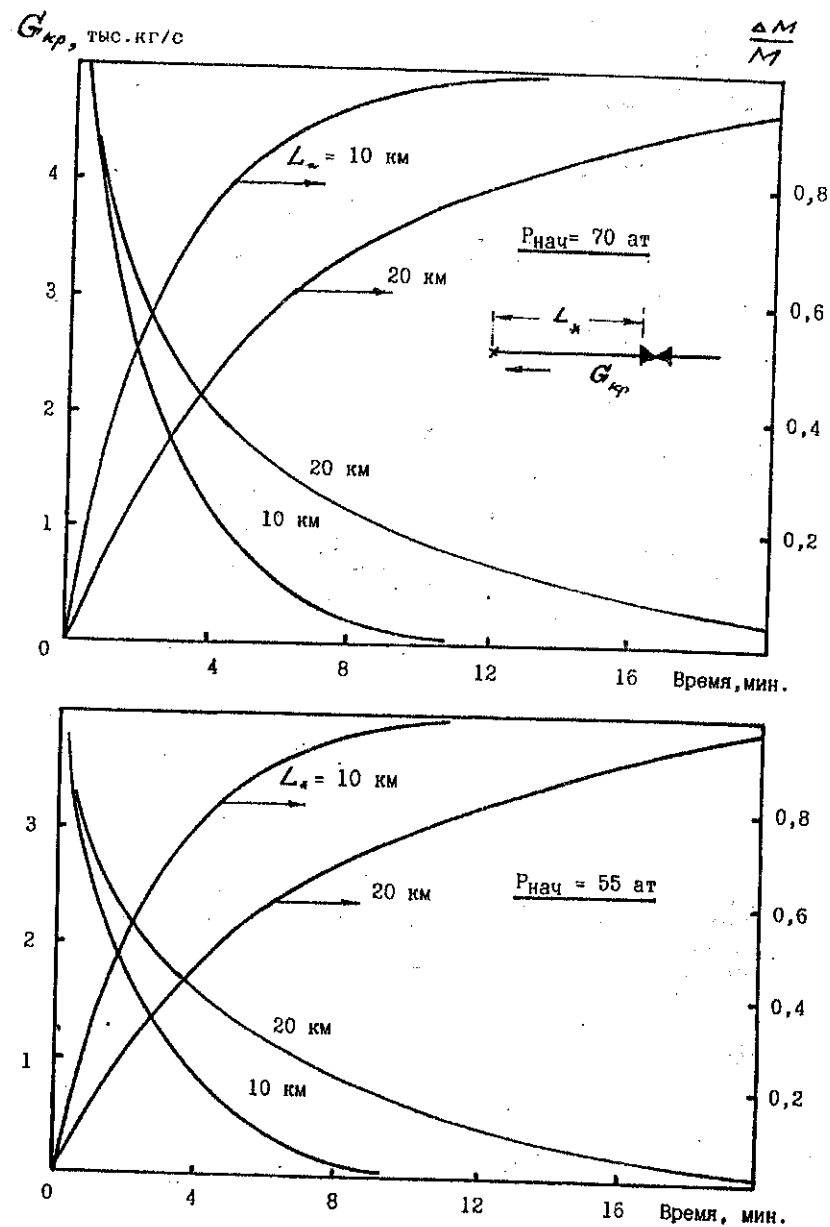
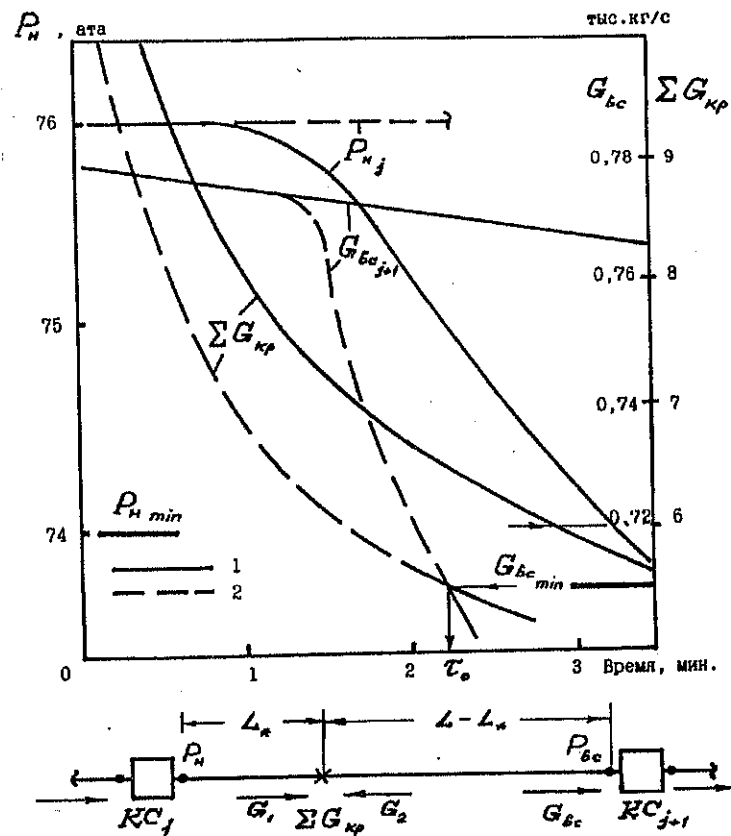


Рис. 6. Динамика опорожнения отсеченного с одного конца участка газопровода  $D_v=1400$  мм



**Рис.7.** Динамика изменения технологических параметров 6-и ниточного газопровода  $D_y=1400$  мм длиной 120 км при различных вариантах разрыва одной из ниток (1 -  $L_* = 30$  км; 2 -  $L_* = 90$  км)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сулейманов В.А. Расчет нестационарных режимов эксплуатации газопроводов // Энергетика и транспорт, 1987, т.25, №1, с.134-142.
2. Едигаров А.С., Сулейманов В.А. Математическое моделирование аварийного истечения и рассеивания природного газа при разрыве газопровода // Математическое моделирование, 1995, т.7, №4, с.37-52.
3. M.Foster Transient flow analysis of gas pipeline systems // Pipeline Industry, 1981, december, p.25-28.
4. R.P.Bell Isopleth calculations for ruptures in sour gas pipeline // Energy Processing Canada, 1978, July-August, p.36-39.

истечение газа через "отверстие" из сосуда высокого давления. \*)  
Рассматривается критическое истечение "идеального" газа из толстостенного сосуда высокого давления при аварийном обрыве, например, патрубка или из отверстия, образованного коррозионными дефектами. Предполагается, что интенсивность внешнего теплообмена (вынужденная конвекция) значительно превышает интенсивность внутреннего теплообмена, т.е. температура стенки  $T_w$  примерно соответствует температуре окружающей среды  $T_0$ . Кроме того предполагается, что вследствие высокой теплоемкости сосуда скорость изменения температуры газа  $T_g$

много больше скорости изменения температуры стенки (т.е.  $\frac{\partial T_g}{\partial t} \gg \frac{\partial T_w}{\partial t}$ ) и что за период опорожнения температура (средняя по толщине) стенки сосуда не изменится. Тогда тепловой поток от стенки сосуда к газу

$$\frac{dq}{dt} = \alpha_s F \cdot [T_0 - T_s],$$

где  $\alpha_s = f(\Delta T) = f(\tau)$  - коэффициент теплоотдачи;  $F$  - поверхность теплообмена. Внутренний теплообмен осуществляется за счет механизма свободной конвекции. Число Нуссельта -  $Nu_s = b \cdot Ra^{1/3}$ , где  $Ra = Gr \cdot Pr$  - число Релея.

Тогда коэффициент теплопередачи -  $\alpha_s = A (T_0 - T_s)^{1/3}$ . Откуда

$$\frac{dq}{dt} = AF(T_0 - T_s)^{4/3}. \quad (3.6)$$

Как показали расчеты, коэффициент  $A$  (аппроксимация теплофизических характеристик газа) слабо зависит от температуры и может быть выражен функцией вида  $A = A_0 P^{2/3}$  ( $A_0$  - числовая константа)

Изменение параметров состояния газа в емкости описывается системой уравнений термодинамики тела с переменной массой

$$\frac{dP}{dt} = \frac{k-1}{V} \left( \frac{dq}{dt} - i \cdot G \right) \quad (3.7)$$

$$\frac{dP}{d\rho} = - \frac{k-1}{G} \left( \frac{dq}{dt} - i \cdot G \right) \quad (3.8)$$

где энтальпия газа  $i = \frac{k}{k-1} RT_g$ ;  $P$  - давление;  $G$  - массовый расход:

$$G = \mu f_0 B \frac{P}{\sqrt{T_s}}, \quad B = \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{1}{R}};$$

$\mu$  - коэффициент расхода;  $f_0$  - площадь сечения "отверстия";  $k = \frac{C_p}{C_v}$  - показатель адиабаты;  $V$  - объем сосуда.

\*) раздел подготовлен совместно с С.В. Овчаровым, О.С. Дворниковым

Дополнительно используется уравнение состояния идеального газа, которое после дифференцирования по времени дает

$$\frac{dP}{d\tau} = R\rho \frac{dT}{d\tau} + RT \frac{d\rho}{d\tau} \quad (3.9)$$

После линеаризации ряда нелинейных функций и интегрирования получим изменение параметров газа в сосуде:

$$\frac{T_g}{T_0} = \frac{C}{C+R} \left[ \text{th}^2 \left( N\tau + \text{arth} \sqrt{\frac{C}{C+R}} \right) \right]^{-1} \quad (3.10)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left\{ \sqrt{\frac{R}{C}} \text{Sh} \left( N\tau + \text{arth} \sqrt{\frac{C}{C+R}} \right) \right\}^{-\delta} \quad (3.11)$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{C}{C+R} \left\{ \left[ \sqrt{\frac{R}{C}} \text{Sh} \left( N\tau + \text{arth} \sqrt{\frac{C}{C+R}} \right) \right]^{\delta} \cdot \text{th}^2 \left( N\tau + \text{arth} \sqrt{\frac{C}{C+R}} \right) \right\}^{-1} \quad (3.12)$$

и динамику истечения газа:

$$G = \mu B f_0 P_0 \sqrt{\frac{C}{C+R}} \left\{ \left[ \sqrt{\frac{R}{C}} \text{Sh} \left( N\tau + \text{arth} \sqrt{\frac{C}{C+R}} \right) \right]^{\delta} \cdot \text{th}^2 \left( N\tau + \text{arth} \sqrt{\frac{C}{C+R}} \right) \right\}^{-1} \quad (3.13)$$

где

$$N = (k-1) \sqrt{C(C+R)} \mu B f_0 \frac{\sqrt{T_0}}{2V}; \delta = \frac{2R}{(R+C)(k-1)}; C = \frac{1.01 A_0 \sqrt{T_0}}{\mu B \frac{f_0}{F}} \left( \frac{T_0}{P_0} \right)^{1/3} \equiv \text{const}$$

$P_0, \rho_0, T_0$  - начальные значения параметров газа в сосуде.

Скорость истечения потока равна местной (для "сжатого" сечения при

$$f = f_{\min} = f_0 \text{ скорости звука } W_{\text{кр}} = a = \sqrt{kRT} = \sqrt{k \frac{P}{\rho}}.$$

Критические параметры состояния газа в "сжатом" ("выходном") сечении могут быть выражены через так называемые "параметры заторможенного потока" ( $W=0$ ), в данном случае через параметры в сосуде.

$$\left. \begin{aligned} \rho_{\text{кр}} &= \rho(\tau) \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k+1}} \\ T_{\text{кр}} &= T(\tau) \frac{2}{k+1} \\ P_{\text{кр}} &= P(\tau) \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k}} > P_a \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Сравнение расчетов по формулам (3.10)-(3.13) с экспериментами (Н.П.Бели, Н.М.Беляев, Г.С.Шандров "Расчет процесса опорожнения газовой емкости"-Инженерно-физический журнал, 1964, т.VII, №9, с.25-28) показало хорошее согласование.

При снижении давления в сосуде до величины  $P(\tau) \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \leq P_a$  в выходном сечении устанавливается атмосферное давление  $P_a$  и массовый расход начинает зависеть от отношения давлений  $P(\tau)/P_a$ .

$$G_{\text{док}} = \mu f_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1}} P_0 \left[ \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \quad (3.15)$$

Рассмотрим также другую возможность получения верхней и нижней оценок рассматриваемого процесса. По определению

$$a = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}, \quad d\rho = d\left(\frac{1}{V}\right) = -\frac{dV}{V^2}.$$

Характеризуя процесс изменения состояния газа в сосуде как политропический  $PV^n = \text{const}$  ( $n$  - показатель политропы), с учетом уравнения состояния  $PV = RT$ , получим

$$\left\{ \begin{aligned} G d\tau &= -\frac{V}{nRT} dP \\ \frac{V}{V_j} &= \left( \frac{P_j}{P} \right)^{1/n} \end{aligned} \right. \quad (3.16)$$

Для критического режима  $G \equiv G_{\text{кр}}$ .

$$t = -\frac{1}{n} \int_1^{\Pi} \Pi^{-\frac{3n-1}{2n}} d\Pi$$

$$t = \frac{\tau}{\tau_*}; \Pi = \frac{P(\tau)}{P_0}; \tau_* = \frac{V}{\mu f_0 \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k}} RT_0}} \quad (3.17)$$

При  $n=1, T=T_0=\text{const}$  (изотермический процесс)

$$\frac{P}{P_0} = \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_*}\right) \quad (3.18)$$

При  $q=0$ ,  $n=k$  - (внешнеадиабатический процесс).

$$\frac{P}{P_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \frac{\tau}{\tau_0}\right)^{-\frac{2k}{k-1}} \quad (3.19)$$

Текущее значение температуры может быть определено с использованием уравнения адиабаты  $PV^k = \text{const}$  и уравнения состояния

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \frac{\tau}{\tau_0}\right)^{-2} \quad (3.20)$$

Для докритического режима опорожнения при  $\tau > \tau_{кр}$  (при  $P < P_{кр}$ ) задача сводится к решению дифференциального уравнения

$$\left(\Pi^{2/k} - \Pi^{\frac{k+1}{k}}\right)^{-1/2} \frac{d\Pi}{\Pi} = \frac{\mu f_0 \sqrt{2k}}{V} n \sqrt{RT} dt, \quad (3.21)$$

которое при определении "n" (типичные случаи:  $n=1$  и  $n=k$ ) может быть приведено к биномиальному интегралу типа:

$$\int x^m (a + bx^n)^p dx,$$

имеющему решение для одного из случаев:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{p}{m+1} \\ \frac{m+1}{v} \\ \frac{m+1}{v} + p \end{array} \right\} - \text{целое число.}$$

В качестве характерных примеров на рис. 8 представлены выполненные по формулам (3.10) - (3.13) расчеты интенсивности истечения пропана и метана из технологических аппаратов.

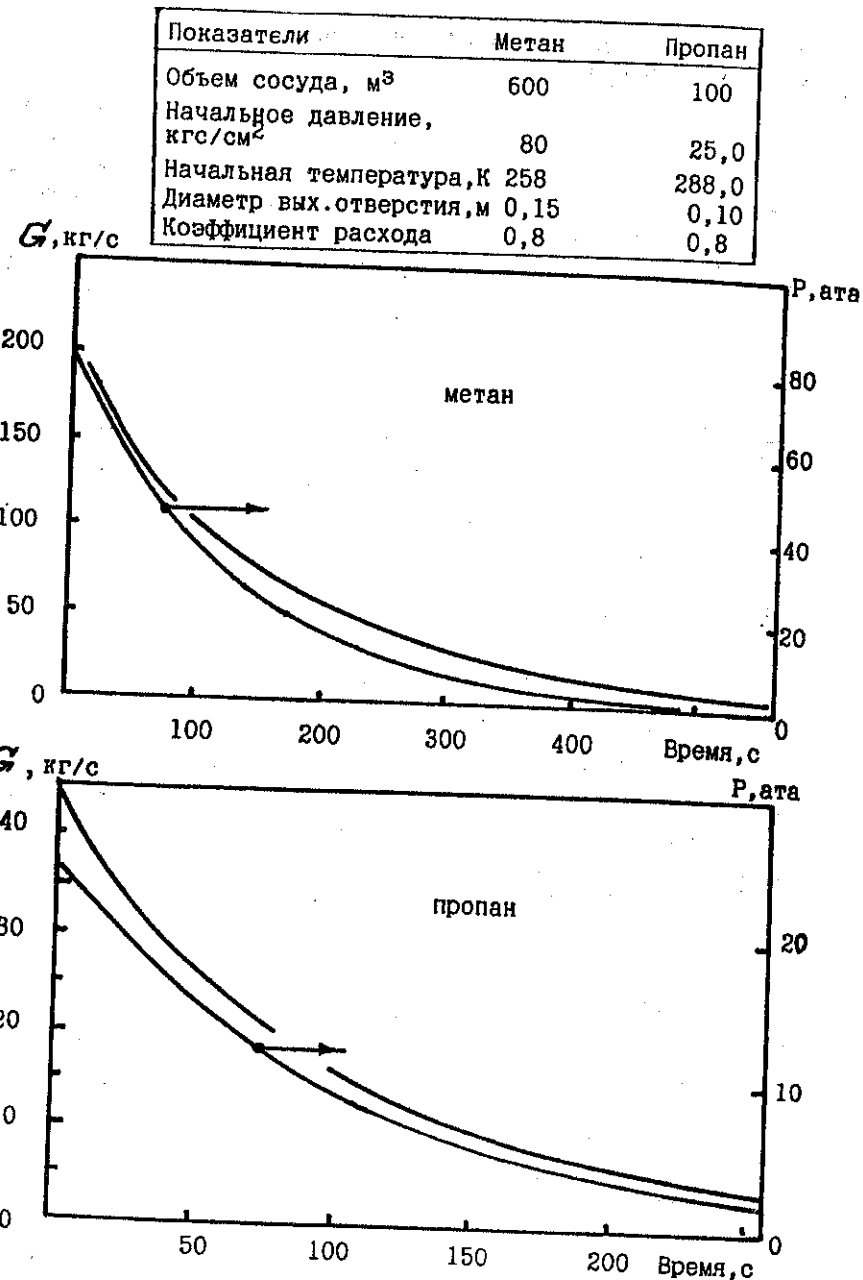


Рис. 8. Динамика опорожнения технологических сосудов под давлением



## Рассеивание в атмосфере аварийных выбросов из скважин и трубопроводов \*

Исходя из физических представлений и анализа специфики выбросов газа под давлением из аппаратов, трубопроводов или скважин, можно утверждать, что в ближней области (за звуковым ядром в случае истечения газа со звуковой скоростью или за начальным участком для дозвуковых струй) выбрасываемая примесь рассеивается по законам струйного (эжекционного) смешения, а область "загрязнения" представляет собой некоторый изогнутый, расходящийся в направлении ветра конус, касающийся земли на некотором расстоянии от источника выброса [1]. На определенном расстоянии от источника осевая скорость струи становится соизмерима со скоростью сносимого воздушного потока, и начинает доминировать диффузионный механизм рассеяния.

Базируясь на этих основных предпосылках, модель рассеивания должна одновременно обеспечивать проведение многовариационных расчетов зон вероятного поражения в широком диапазоне изменения параметров течения (скорости, плотности, температуры) с учетом нестационарности распространяемой струи при всех возможных стратификациях атмосферы, скоростях ветра и т.д., как этого требует анализ риска химически опасных производств.

В общем случае математическое описание турбулентного течения, обусловленного взаимодействием вытекающей из скважины или трубопровода струи газа с атмосферным потоком воздуха, требует рассмотрения полной системы уравнений Навье-Стокса, характеризующих поведение двухкомпонентного вязкого сжимаемого газа в поле силы тяжести [2]. Для решения ряда практических задач указанная математическая постановка может быть упрощена.

Одной из таких важных практических задач является расчет зоны поражения при авариях, сопровождающихся выбросом газа вертикально или наклонно по отношению к направлению ветра. В этих случаях траектория результирующего потока оказывается в одной плоскости с направлением ветра. Рекомендуемая для расчета рассеивания аварийных выбросов модель [3] основана на предположении, что для рассматриваемого класса турбулентных течений конвективный поток примеси в направлении ветра значительно больше соответствующего диффузионного и что распределение параметров течения в поперечном относительно ветра направлении подчиняется, как правило, нормальному закону.

Постановка рассматриваемой задачи сводится к решению системы двумерных дифференциальных уравнений в частных производных, которые в консервативной форме отражают законы сохранения массы, импульса и энергии, с последующим восстановлением параметров течения в третьем направлении по закону:

$$\Psi(x, y, z, \tau) = \Psi_a(z) + \Psi^*(x, 0, z, \tau) \Psi(x, y) \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho C^*)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u C^*)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w C^*)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho K_z \frac{\partial C^*}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial(\rho u^*)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u u^*)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w u^*)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho K_z \frac{\partial u^*}{\partial z} \right) - \frac{1}{\Psi_u} \frac{\partial P}{\partial x} + S_u$$

$$\frac{\partial(\rho w^*)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u w^*)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w w^*)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho K_z \frac{\partial w^*}{\partial z} \right) - \frac{1}{\Psi_w} \frac{\partial P}{\partial z} - \rho g$$

$$\frac{\partial(\rho H^*)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u H^*)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w H^*)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho K_z \frac{\partial H^*}{\partial z} \right) - \frac{1}{\Psi_H} \frac{DP}{Dz} + S_H$$

(3.25)

$$\text{где: } S_u = \frac{1}{\Psi_u} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho K_z \frac{\partial u_a}{\partial z} \right) - \rho w \frac{\partial u_a}{\partial z} \right], S_H = - \frac{1}{\Psi_H} \left[ \gamma \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho K_z \frac{\partial H_a}{\partial z} \right) - \rho w \frac{\partial H_a}{\partial z} \right],$$

$\rho$  - плотность смеси,  $u, w$  - горизонтальная и вертикальная компоненты вектора скорости,  $C$  - концентрация,  $H$  - энтальпия,  $P$  - давление,  $K$  - коэффициент турбулентной диффузии,  $g$  - ускорение свободного падения,  $\gamma$  - показатель адиабаты. Индекс "а" - отражает отклонение функций от начального распределения для бесконечного линейного источника, расположенного вдоль оси  $Y$ , индекс "а" - соответствует параметрам атмосферы в момент выброса.

При этом функция  $\psi(x, y)$  является решением обобщенного дифференциального уравнения

$$\rho u \frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho K_y \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) \approx \overline{\rho K_y} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2}$$

при граничных условиях  $\psi(0, y) = \delta(y)$ ,  $\psi(x, \infty) \rightarrow \infty$

$$\Psi(x, y) = \frac{1}{2\sqrt{\pi K_0 x}} \exp\left(-\frac{y^2}{4K_0 x}\right), \quad \text{где } K_0 = \frac{\overline{\rho K_y}}{\rho u} \quad (3.26)$$

Из уравнения (3.26) очевидна связь между дисперсией ( $\sigma$ ) в нормальном законе распределения и турбулентной вязкостью  $K_y$ :

$$\sigma_y = \sqrt{2K_0 x} \quad (3.27)$$

\*1) раздел подготовлен А.С. Едигаровым

Граничные и начальные условия системы выглядят следующим образом: в заданных границах расчетной области, где по условию задачи задан невозмущенный атмосферный поток:

$$u^*(x, z, \tau) = w^*(x, z, \tau) = H^*(x, z, \tau) = 0; \quad \rho(x, y, z, \tau) = \rho_a(z).$$

В приземном слое ( $z=0$ ):  $u^*(x, 0, \tau) = w^*(x, 0, \tau) = 0$ , так как  $u(x, y, 0, \tau) = w(x, y, 0, \tau) = 0$ ;

$$\rho K_z \left( \frac{\partial C^*}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{в предположении непроницаемости земной поверхности для}$$

примеси ее поток в приземном слое равен нулю).

Вблизи источника выброса термодинамические параметры струи определяются плотностью и температурой газовой примеси, вертикальная скорость струи соответствует скорости истечения газа, массовая концентрация  $C=100\%$ . Начальные условия характеризуют состояние атмосферы в момент выброса ( $H_a(z), \rho_a(z), U_a(z)$ ).

Для замыкания системы уравнений (3.25) использовалось уравнение состояния для идеального газа.

При выводе исходной системы уравнений использовалась алгебраическая модель коэффициентов турбулентного переноса (К). Определение этих коэффициентов в рассматриваемой задаче представляет собой самостоятельную проблему. Для ее решения воспользуемся идеей о связи турбулентной вязкости в струйном потоке с кинетической энергией турбулентности  $E$  и ее масштабом  $L$ , высказанной А.Н. Колмогоровым [4] и Л.Прандтлем [5]:

$$K_t \sim E^{0.5} L$$

Полагая, что  $E^{0.5} \sim V'$ ,  $L \sim b$ , получим

$$K_t = \chi \bar{C}_p V' b \quad (3.28)$$

где  $V'$  - характерный масштаб скорости турбулентных пульсаций;  $b$  - характерный масштаб струи;  $\chi$  - эмпирический коэффициент, принятый равным 0.3 для круглых струй, аналогично модели Прандтля,  $\bar{C}_p$  - поправочный коэффициент для струй, плотность которых отлична от плотности воздуха.

При таком выборе уравнения для расчета коэффициентов турбулентного переноса ключевым параметром становится флуктуационная скорость турбулентного потока, для оценки которой использовалось уравнение вида:

$$V' = \beta \cdot V_a = \left[ 0,08061 + \text{abs} \left\{ \frac{0,5 g w \left( \frac{\rho_a}{\rho} - 1 \right)}{U^3} \right\} \right] \cdot \left[ \text{abs} \{ U^2 - u U_a \} + 4,5 \text{abs} \left\{ \frac{w U_a}{U} \right\} \right] \quad (3.29)$$

где  $U = \sqrt{u^2 + w^2}$ ,  $\beta$  - поправочный коэффициент, учитывающий локальную природу флуктуационной скорости турбулентного потока [3],  $V_a$  - скорость смешения [6].

В качестве характерного масштаба рассматриваемого струйного течения использовалось следующее выражение

$$b = (z_s - z_l) u_0 / U_0 \quad (3.30)$$

где  $U_0 = \sqrt{u_0^2 + w_0^2}$  - модуль вектора скорости на оси струи.

Можно утверждать, что наиболее вероятным режимом истечения газа из скважин или свободно ориентированных в пространстве одиночных трубопроводов высокого давления является звуковое истечение при сверхкритических перепадах давления. Структура и закономерности распространения недорасширенных газовых струй существенно отличаются от таковых при дозвуковом струйном истечении. Экспериментальные наблюдения свидетельствуют о ярко выраженной ударно-волновой структуре струи с периодическим изменением основных ее газодинамических параметров в продольном направлении и седловидным поперечным профилем на звуковом участке нерасчетной струи от отверстия истечения до переходной зоны. Ударно-волновая структура струи имеет вид чередующихся ячеек ("бочек"), размеры которых зависят от геометрических параметров отверстия и режима истечения. Разработка единого алгоритма, позволяющего с приемлемой точностью рассчитать газодинамические параметры во всем поле течения, представляет собой очень серьезную проблему, которая выходит за рамки исходной постановки задачи. Для того, чтобы правильно сформулировать эту задачу в рамках системы уравнений (3.25), необходимо знать геометрические размеры звуковой области (длину звукового ядра и диаметр звукового сечения) и корректно поставить краевые условия на границе звукового ядра.

Рекомендуемые в [7,8] для этой цели эмпирические соотношения получены в результате обобщения и анализа экспериментальных данных по нерасчетным струйным течениям в широком диапазоне изменения безразмерного перепада давления перед соплом от 2 до 40.

Указанные соотношения непосредственно использовались в численном алгоритме [3] при формулировании жестких краевых условий на границе звукового участка нерасчетной струи.

Численная реализация математической модели и алгоритма [3] осуществлялась с помощью консервативной конечно-разностной схемы, основанной на совместном использовании модифицированного метода расщепления по физическим процессам и пространственным направлениям в сочетании с методом контрольного объема.

Рассмотренная модель струйного рассеивания предназначена прежде всего для анализа аварийных выбросов химически опасных веществ, предельно допустимая концентрация которых в воздухе составляет несколько процентов. Например, зона поражения при аварийном выбросе метана определяется его нижним пределом воспламенения в воздухе (5% об. или 50000 ppm) и составляет от нескольких десятков до нескольких сотен метров.

В отличие от горючих газов, предельно допустимая концентрация токсичных веществ, как правило, значительно ниже (несколько десятков ppm), а протяженность зоны поражения может составить несколько километров. Этим определяется специфика расчета процесса рассеивания токсичных газов. Получение численного решения задачи (3.25, 3.28) для всей области исследования (струйного участка и диффузионного следа) практически нереально по двум причинам: 1) вынужденное использование подробной сетки в струйной области приводит к появлению огромных пространственных массивов параметров течения (характерный размер источника (как правило) составляет ~1 м, а исследуемой области - до 10-20 км); 2) необходимость выявления концентраций, которые по порядку величины могут быть значительно меньше точности численного решения. Указанные трудности могли бы быть преодолены путем перехода

на определенной стадии расчета к модели диффузионного рассеивания [9].

В соответствии с [9] численное решение задачи (3.25, 3.28) о взаимодействии струйного потока, содержащего примесь, с ветровым потоком ведется до того сечения, в котором осевая скорость струи приблизится к скорости сносящего потока с заданной точностью, а временное изменение концентрации примеси в указанном сечении не уменьшится до заданного уровня. Относительно этого же начального сечения рассматривается диффузионная задача с выполнением условий сопряжения моделей струйного массопереноса и диффузионного рассеивания в указанном переходном сечении.

Сопряжение моделей расчета и переход к уравнению Гаусса в квазистационарном приближении для расчета зоны поражения практически осуществлялись следующим образом. Для определенного момента времени  $\tau = \tau^*$ , когда временное изменение концентрации примеси в переходном сечении струи  $X = X_0$  (где горизонтальная скорость струи составляла не менее 0,997 от скорости на ее оси) снижалось до величины порядка  $10^{-6}$ , численное интегрирование нестационарных уравнений сохранения массы, импульса и энергии в предложенной постановке (3.25, 3.28) прекращалось. Сопряжение решений проводилось по значению осевой концентрации примеси в переходном сечении струи и полученному вертикальному распределению концентрации от оси до поверхности земли. Для этого предполагалось, что в момент времени  $\tau = \tau^*$  продольное и поперечное распределение примеси от виртуального источника в пространстве на некотором расстоянии  $x$  от источника выброса подчиняется известному закону Гаусса:

$$C(x, y, z, \tau^*) = \frac{M(\tau^* - x / U_a)}{2\pi U_a \sigma_y (x + x_{vy}) \sigma_z (x + x_{vz})} \exp \left\{ -\frac{y^2}{2\sigma_y^2 (x + x_{vy})} \right\} \left[ \exp \left\{ -\frac{(z - h_0)^2}{2\sigma_z^2 (x + x_{vz})} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z + h_0)^2}{2\sigma_z^2 (x + x_{vz})} \right\} \right] \quad (3.31)$$

где  $M$  - массовый расход примеси.

Виртуальный источник расположен на высоте, соответствующей высоте оси струи в переходном сечении  $h_0$ . В горизонтальной плоскости виртуальный источник смещен относительно реального на расстояние  $X_{vz}$ ,  $X_{vy}$ . Конкретное значение продольного смещения  $X_{vz}$  определяется из условия сопряжения профиля концентрации в переходном сечении с соответствующим нормальным законом распределения:

$$\sigma_z(x_{vz}) = \frac{h_0}{\sqrt{2 \ln \left( \frac{C^*}{C_s} \right)}}$$

где  $C^*$  - концентрация примеси на оси струи в переходном сечении;  $C_s$  - концентрация примеси у поверхности земли или на границе струи в том же сечении.

Виртуальное расстояние  $X_{vy}$  определяется из условия равенства численного решения для осевой концентрации в переходном сечении и концентрации, рассчитанной по уравнению (8) от виртуального источника, расположенного на расстояниях  $X_{vz}$ ,  $X_{vy}$  от реального источника выброса:

$$C^* = C(\tau = \tau^*, x = x_0, y = 0, z = h_0) = \frac{M(\tau^* - x_0 / U_a)}{2\pi U_a \sigma_z(x_{vz}) \sigma_y(x_{vy})}$$

Для расчета продольных и поперечных дисперсий в данной работе использованы различные эмпирические соотношения в зависимости от категории атмосферной устойчивости и характера местности, рекомендованные Бригсом [14].

Верификация приведенной математической модели [3] в области струйного течения и рассеивания осуществлялась путем сравнения результатов расчета с данными модельных экспериментальных исследований различных типов струйных течений, а именно: "затопленных" неплавучих струй, вертикальных струй в сносящем потоке, наклонных струй, нагретых струй и струй газа с отличной от воздуха плотностью [1, 13] в

диапазоне изменения "гидродинамического параметра"  $q = \left( \frac{\rho_0 U_0^2}{\rho_a U_a^2} \right)$  от 70 до 200;

при отношении скоростей  $\frac{U_0^2}{U_a^2}$  от 2 до 10; плотностей  $\frac{\rho_0}{\rho_a}$  от 0,15 до 1,0 и разностях температур между истекающим потоком и воздухом до 160 градусов.

В качестве иллюстрации достоверности модели на рис. 9 и 10 представлены некоторые результаты тестирования в виде траекторий струи и распределения концентрации по ее оси. Сравнительный анализ показал, что в целом рекомендуемый метод расчета в области струйного рассеивания обеспечивает хорошее согласование с экспериментами по классическим струйным течениям.

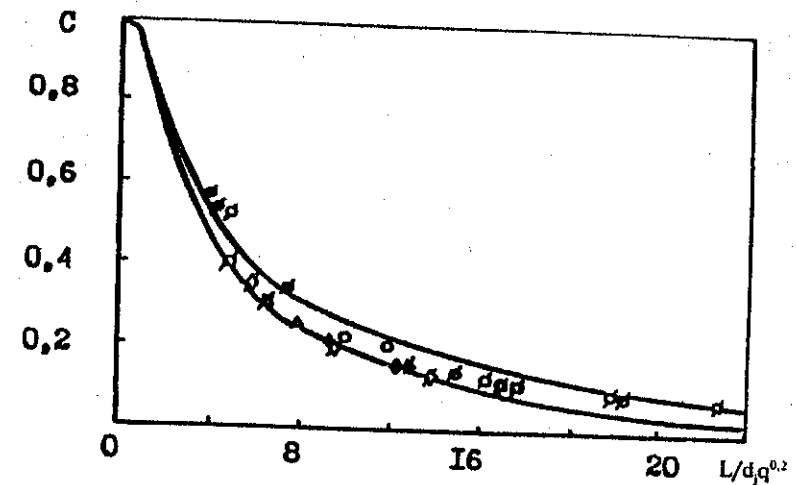
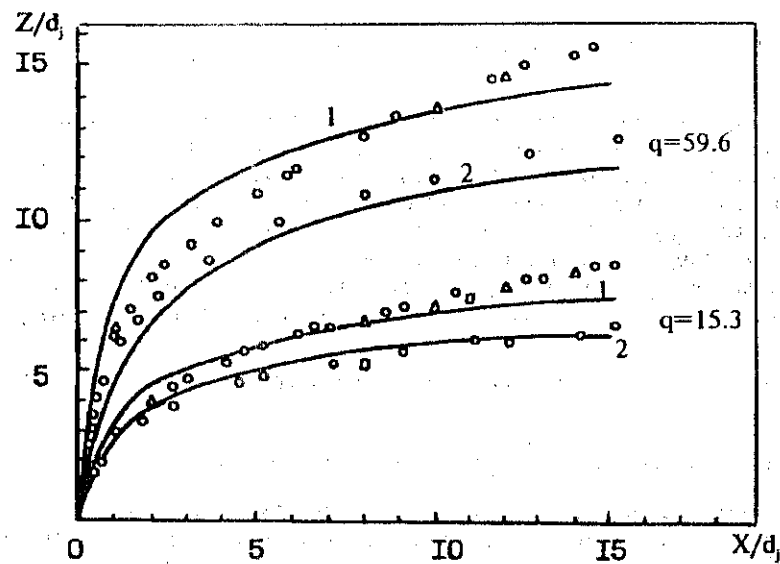


Рис.9. Теоретическое и экспериментальное распределение концентрации вдоль траектории ( $L$ ) струи газа.

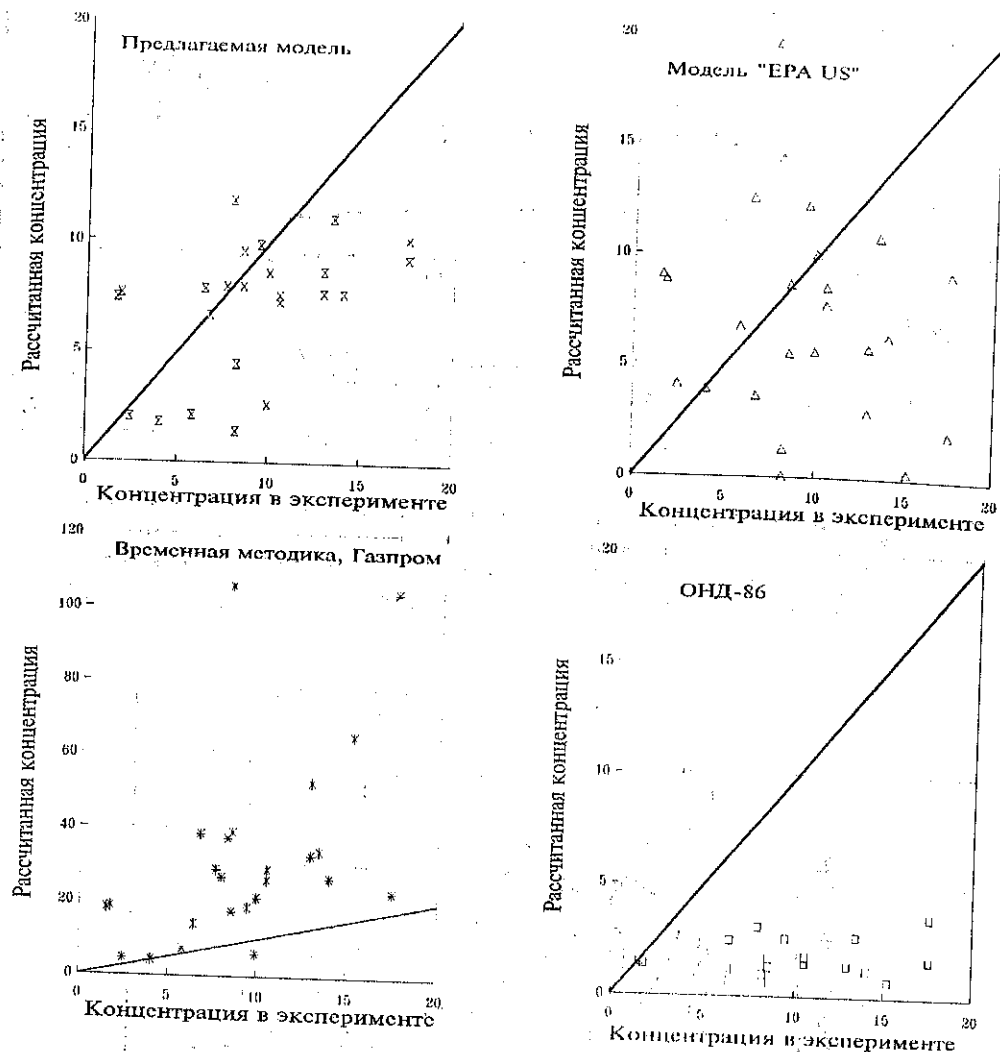


**Рис. 10.** Расчетные и экспериментальные траектории нагретых струй (1 - скоростная траектория, 2 - температурная траектория)

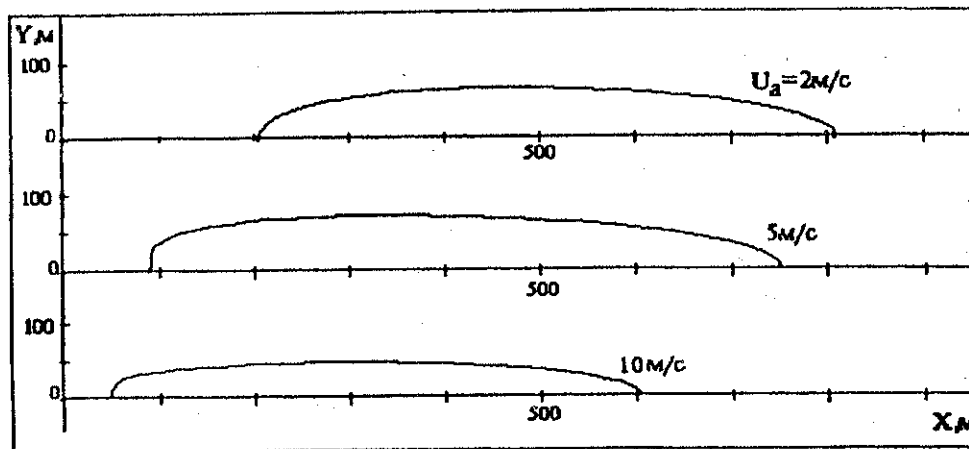
Среди имеющихся крупномасштабных экспериментов наибольшую информацию для верификации струйно-диффузионной модели дают натурные исследования, проведенные в октябре - декабре 1982 г. после аварийного выброса газовой смеси, содержащей сероводород и оксид серы, из скважины, расположенной в 20 км от г.Лоджпоул (провинция Альберта, Канада).

Результаты этих исследований и данные расчетов по предложенной модели, а также по методикам, рекомендованным Агентством по охране окружающей среды США ("EPA-US") [12], Госкомгидрометом России ("ОНД-86") [11] и РАО "ГАЗПРОМ" [10], приведены на рис.11. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что рекомендуемые в качестве нормативных отечественные методики дают совершенно неадекватные результаты по отношению к эксперименту. Это свидетельствует о неправомерности заложенных в них физических предпосылок и необходимости их кардинального пересмотра для расчета специфических процессов рассеивания при авариях на объектах химической технологии.

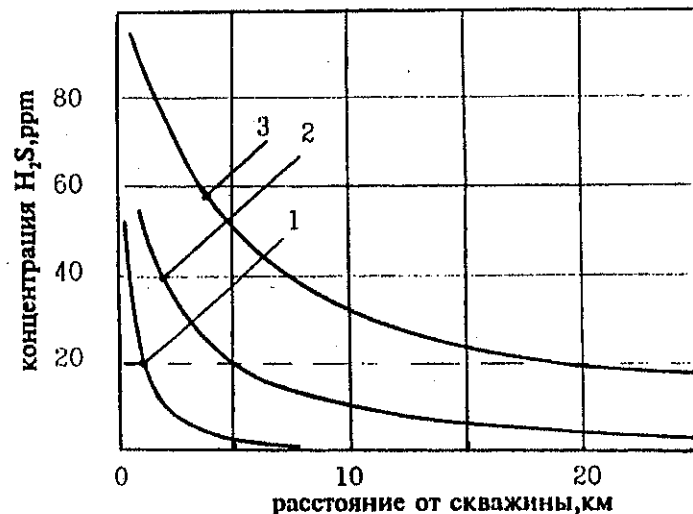
В качестве характерного примера на рис.12 представлены расчеты контура изоконцентрации 20 ppm, (1 % поражения при 30 минутной экспозиции) на уровне поверхности земли при фонтанировании природного газа, содержащего 25 % объемных сероводорода с дебитом 0,617 млн. м<sup>3</sup> в сутки из скважины диаметром 114 мм и его рассеивании в атмосфере при классе устойчивости "D" и различных скоростях ветра, а на рис.13 - расчеты по влиянию устойчивости атмосферы на формирование шлейфа при дебите 11,6 млн. м<sup>3</sup>/сут из скважины Ду 300. мм.



**Рис. 11.** Сравнение данных натурных измерений приземной концентрации  $H_2S$  при аварийном фонтанировании скважины (1 млн.м<sup>3</sup> в сутки, Альберта, Канада) с различными математическими моделями описания процесса рассеивания примеси.



**Рис. 12.** Влияние скорости ветра на дальность распространения приземной концентрации  $H_2S$  - 20 ppm при выбросе природного газа с содержанием  $H_2S$  25% об. из скважины  $D_y = 114$  мм с дебитом 0.617 млн.  $nm^3$ /сутки. (Класс устойчивости атмосферы "D").



**Рис. 13.** Влияние "устойчивости" атмосферы (1 - класс "B", 2 - класс "D", 3 - класс "F";  $U_a = 5$  м/с) на распределение приземной концентрации  $H_2S$  при аварийном выбросе природного газа с исходным содержанием  $H_2S$  25% об. из скважины  $D_y = 300$  мм с дебитом 11.6 млн.  $nm^3$ /сутки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бруцкий В.В. Турбулентные стратифицированные струйные течения, Киев: Наукова Думка, 1986.
2. Методы расчета турбулентных течений, М.: Мир, 1984.
3. Едигаров А.С., Сулейманов В.А. Математическое моделирование аварийного истечения и рассеивания природного газа при разрыве газопровода // Математическое моделирование, 1995, т.7, №4, с.37-52.
4. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Доклады АН СССР, 1941, том 30, №4, с.299-303.
5. Prandtl L., Weighardt K. Uber ein neues Formelsystem fur die ausgebildete Turbulenz // Nach. Akad. Wiss. Gottingen Math. - Phys. Kl., 1945, s.6-19.
6. Bloom S.G. A mathematical model for reactive, negatively buoyant atmospheric plumes // Heavy Gas and Risk Assessment, Germany, 1980, p.103-123.
7. Нещерет П.А., Капустин Е.А., Шлик О.Э. К расчету течения в основном участке сверхзвуковой струи с учетом влияния торца сопла // ИИМТФ, 1984, №5, с.81-85.
8. Ленцов И.А., Серебряков В.А. Исследование и расчет геометрических характеристик сверхзвукового участка нетурбулизированных газовых струй // Сб. научных трудов "Газовая динамика и акустика струйных течений", Новосибирск, 1987, с.38-42.
9. Едигаров А.С. Метод расчета зоны поражения при аварийных выбросах токсичного газа // Российский химический журнал, 1995, т.39, №2, с.94-100.
10. Белов П.С. "Временная методика расчета газовых выбросов из наземных источников на объектах газовой промышленности" М., РАО "ГАЗПРОМ", 1987, 42 с.
11. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86), Ленинград, Гидрометеоздат, 1987, 94 с.
12. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справочник, ч. II (перевод с англ.), М., Металлургия, 1982 г, 412 с.
13. Аверин Л., Кондрашков Ю., Шевяков Г. "Исследование процесса перемешивания на участке взаимодействия струи с поперечным сносимым потоком" - Инженерно-физический журнал, 1985 г, № 5, с. 751-756
14. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей, Л.: Гидрометеоздат, 1985, (перевод с англ.), с. 351

В настоящее время накоплен большой объем теоретических и экспериментальных исследований по вопросу горения газовых струй в условиях ветрового воздействия. Анализ этих исследований показал, что наиболее обоснованными среди существующего многообразия моделей горения являются так называемые модели поверхностного источника. В основе построения моделей этого типа лежит предположение о том, что пламя является трехмерным объемным телом, внутри которого происходят различные физико-химические процессы, а излучение в окружающее пространство происходит с наружной "оболочки" пламени (как твердого тела) и выражается через коэффициент излучения и величину общего тепловыделения. В качестве модельного приближения достаточно сложной и спонтанно меняющейся геометрической фигуры пламени используется, как правило, усеченный конус. Разработанный во ВНИИГАЗе алгоритм и программа расчета теплового излучения от струйного пламени основаны на систематизации и анализе результатов лабораторных исследований [1] Шеффилдского университета, а также промышленных испытаний факельных систем, осуществленных фирмой "Шелл" [2].

Как следует из общих физических соображений длина видимой части пламени, т.е. протяженность зоны термохимической реакции определяется свойствами газа (горючего) и гидродинамикой смешения, т.е. скоростью поступления воздуха (окислителя) в зону горения. Поскольку ветер оказывает определенное влияние на характер смешения, в качестве базовой принята длина пламени в спокойной атмосфере " $L_{Bo}$ ", т.е. когда процесс горения определяется "чистым" захватом (эжекцией) воздуха через оболочку пламени (см. рис.14).

В соответствии с [2] в случае вертикально расположенных труб  $\bar{\gamma} = \pi/2$  при поперечной ориентации ветра существует связь между относительным уменьшением размеров факела и скоростью ветра  $\omega_a$  (м/с) в виде:

$$\frac{L_B}{L_{Bo}} = 0.49 + 0.51e^{-0.4 \omega_a} \quad (3.33)$$

Для расчета длин факелов на наклонных трубопроводах рекомендуется уравнение вида [2]

$$\frac{L_B}{L_{Bo}} = \left[ 0.49 + 0.51e^{-0.4 \omega_a} \right] \left[ 1 - 6.07 \cdot 10^{-3} \left( \bar{\gamma} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (3.34)$$

Обобщение и анализ многочисленных экспериментальных данных по отклонению пламени под действием ветра от своей исходной оси нашли свое отражение в следующих эмпирических выражениях:

для  $\Omega \leq 0,05$  (слабое влияние ветра)

$$\alpha \bar{Ri}_0 = 8000\Omega + \bar{Ri}_0 \left( \bar{\gamma} - \frac{\pi}{2} \right) \cdot (1 - e^{-25.6\Omega}) \quad (3.35)$$

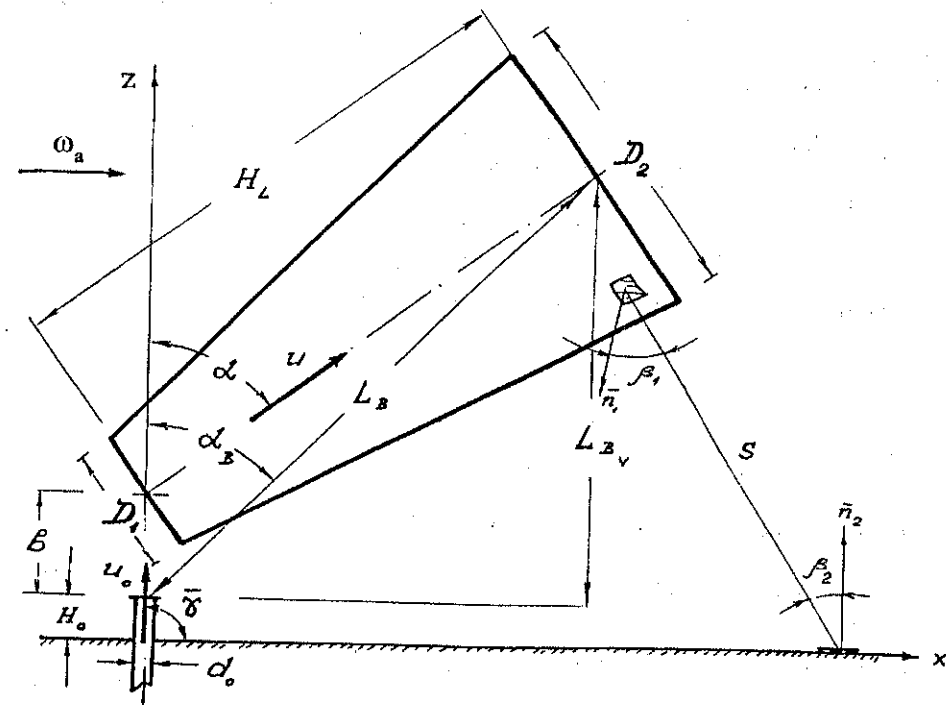


Рис. 14. К расчету теплового излучения от факела при горении высокоскоростной газовой струи.

для  $0,05 < \Omega \leq 0,5$  (заметное и сильное влияние ветра)

$$\alpha \bar{Ri}_0 = 134 + 1726(\Omega - 0.026)^{1/2} + \bar{Ri}_0 \left( \bar{\gamma} - \frac{\pi}{2} \right) (1 - e^{-25.6\Omega}), \quad (3.36)$$

где  $\bar{Ri}_0 = \left( \frac{g}{D_1^2 u_0^2} \right)^{1/3} \cdot L_{Bo}$ ;  $\Omega = u_0 / w_a$ ;  $Ds = d_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_a}}$ ;  $\rho_0$ ,  $\rho_a$  - плотности истекающего газа и воздуха соответственно;  $d_0$  - диаметр трубопровода (скважины);  $u_0$  - скорость истечения газа.

Известно, что за счет гидродинамической неустойчивости процесса смешения пламя отрывается от среза трубы. Расстояние отрыва определяется соотношением

$$b = L_B \frac{\sin(\alpha - \alpha_B)}{\sin \alpha} = L_B \frac{\sin(K_0 \alpha)}{\sin \alpha}, \quad (3.37)$$

где  $K_0 = \frac{\alpha - \alpha_B}{\alpha}$  - коэффициент наклона пламени под действием ветра.

\*) раздел подготовлен совместно с С.В. Овчаровым

Обработка экспериментальных данных позволила получить следующую зависимость

$$K_0 = 0.185e^{-20\Omega} + 0.015 \quad (3.38)$$

Для определения геометрических характеристик пламени (размеров усеченного конуса) рекомендуются соотношения:

- длина усеченного конуса

$$H_L = \sqrt{L_B^2 - b^2 \sin^2 \alpha} - b \cos \alpha \quad (3.39)$$

- малый диаметр усеченного конуса

$$\frac{D_1}{D_s} = (13.5e^{-6\Omega} + 1.5) \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{1}{15} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_o}} \right] e^{-70 Ri_s C \Omega} \right\} \quad (3.40)$$

где  $\overline{Ri}_s = \left( \frac{g}{D_s^3 \cdot u_o^2} \right)^{1/3} \cdot D_s$ ;  $C = 1000e^{-100\Omega} + 0.8$

- большой диаметр усеченного конуса

$$\frac{D_2}{L_B} = (0.18e^{-1.5\Omega} + 0.31) (1 - 0.46e^{-25\Omega}) \quad (3.41)$$

Половина угла раскрытия конуса

$$\operatorname{tg} \xi_k = \frac{D_2 - D_1}{2H_L}$$

Таким образом все размеры принятого геометрического приближения определены полностью.

Следующим этапом является расчет излучения от факела в окружающее пространство. Согласно модели Торнтонна [3] при известной геометрии и пространственной ориентации факела, а также интенсивности излучения с единицы его поверхности (внешней оболочки) облучение произвольной точки пространства рассчитывается как

$$q = E^* \varphi v \quad (3.42)$$

где  $\varphi$  - угловой коэффициент облучения;  $v$  - коэффициент поглощения излучения атмосферой;  $E^*$  - интенсивность излучения с единицы поверхности пламени  $E^* = Q_{изл} / F_\phi$ .

Установлено, что с достаточной степенью точности внешнее излучение количественно можно характеризовать как часть общего теплового потенциала (баланса) сгорания топлива

$$Q_{изл} = G \cdot Q_H^P \cdot \bar{k} \cdot \bar{\eta} = \bar{\eta} Q$$

где  $Q$  - общее тепловыделение факела;  $G$  - массовый расход;  $Q_H^P$  - низшая теплота сгорания;  $\bar{k}$  - коэффициент "недожога";  $\bar{\eta}$  - коэффициент излучения в окружающем пространстве.

Таким образом,

$$E = (Q \bar{\eta}) / F_\phi$$

где площадь излучающей поверхности (усеченного конуса)

$$F_\phi = \frac{\pi}{4} (D_1^2 + D_2^2) + \frac{\pi(D_1 + D_2)}{2} \sqrt{H_L^2 + \left( \frac{D_2 - D_1}{2} \right)^2} \quad (3.43)$$

Согласно современным представлениям радиационная составляющая теплового баланса струйного пламени ( $\bar{\eta}$ ) зависит не от свойств газа, а от гидродинамического смешения с воздухом, т.е. от скорости истечения.

В работе [2] были обобщены данные промышленных испытаний по коэффициенту излучения ( $\bar{\eta}$ ) на трубах 6+12 дюймов для газов с молекулярным весом от 16,94 до 21,1 в виде уравнения

$$\bar{\eta} = 0.11 + 0.21 e^{-0.00323 u_o} \quad (3.44)$$

где  $u_o$  - скорость истечения газа (м/с).

Для оценки дальности прямого огневого воздействия высокоскоростных горящих струй на технологическое оборудование широко используется формула, предложенная Американским нефтяным институтом (API) для спокойной (безветренной) атмосферы

$$L = 1,34 Q^{0.49}, \quad Q \leq 10^4 \quad (3.45)$$

где размерность  $Q$  - МВт;  $L$  - м.

Необходимо учитывать, что при горизонтальном расположении горящих струй их траектория за счет действия "сил плавучести" будет отклоняться в вертикальном направлении. Использование формулы (3.45) для определения опасности прямого огневого контакта будет приводить к завышению соответствующих расстояний: для метана - на 15 - 20 %, для пропана - на 25 - 30%, что в задачах анализа риска может быть принято в расчетный запас. Характерная форма пламени горящих струй пропана и метана при их истечении из горизонтально ориентированного трубопровода показана на рис.15.

На основе изложенных методических разработок и анализа экспериментальной информации во ВНИИГАЗе разработан алгоритм и программа расчета радиационного теплового воздействия на окружающую среду при горении струй газа.

При численных расчетах угловых коэффициентов облучения поверхность излучения пламени эквивалентировалась поверхностью многогранной усеченной пирамиды.

В качестве характерных примеров на рис.16 представлены расчеты интенсивности облучения горизонтальных площадок с подветренной стороны на различных расстояниях от аварийно фонтанирующей и горячей скважины при вариантах истечения газа по основному стволу-лифтовой колонне ( $d_o = 0,1$  м,  $G = 22,1$  кг/с; критическое давление на срезе - 0,9 МПа) и по каналу, образованному шахтным направлением ( $d_o = 0,402$  м,  $G = 437,1$  кг/с; критическое давление на срезе - 1,1 МПа) при скорости ветра 10 м/с. Характеристики фонтанирования даны для геологической структуры и конструкций скважин Бованенковского ГКМ.

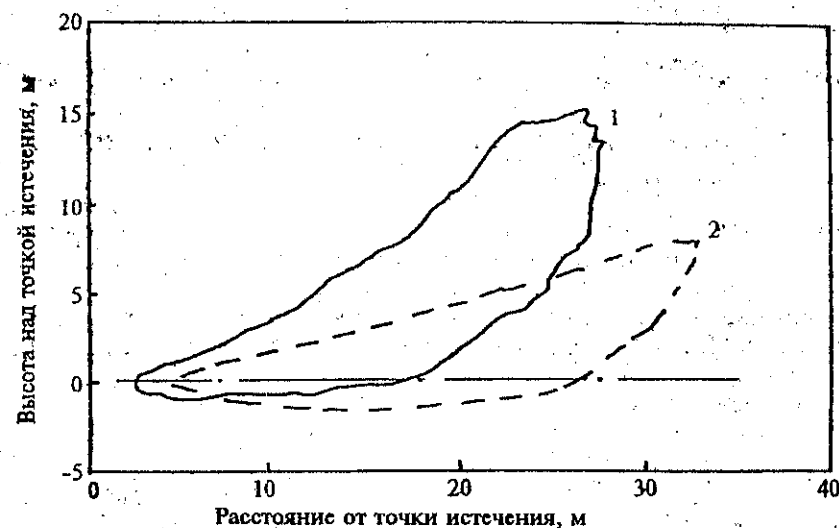


Рис. 15. Конфигурация пламени при истечении газа из горизонтального трубопровода (1 - пропан;  $d_0=50$  мм;  $G=20$  кг/с; 2 - метан;  $d_0=75$  мм;  $G=8.5$  кг/с)

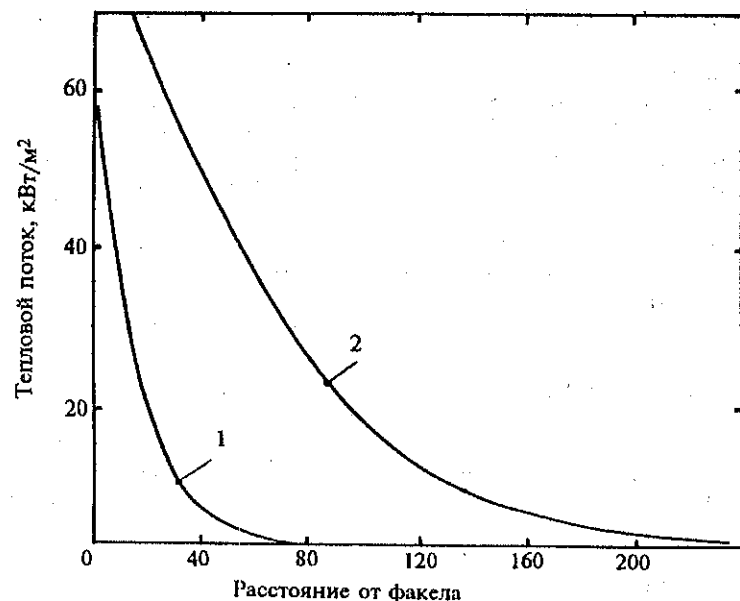


Рис. 16. Тепловое воздействие факела горящей скважины на поверхность грунта (1 -  $d_0=0.1$  м;  $G=22.13$  кг/с; 2 -  $d_0=0.402$  м;  $G=437.1$  кг/с)

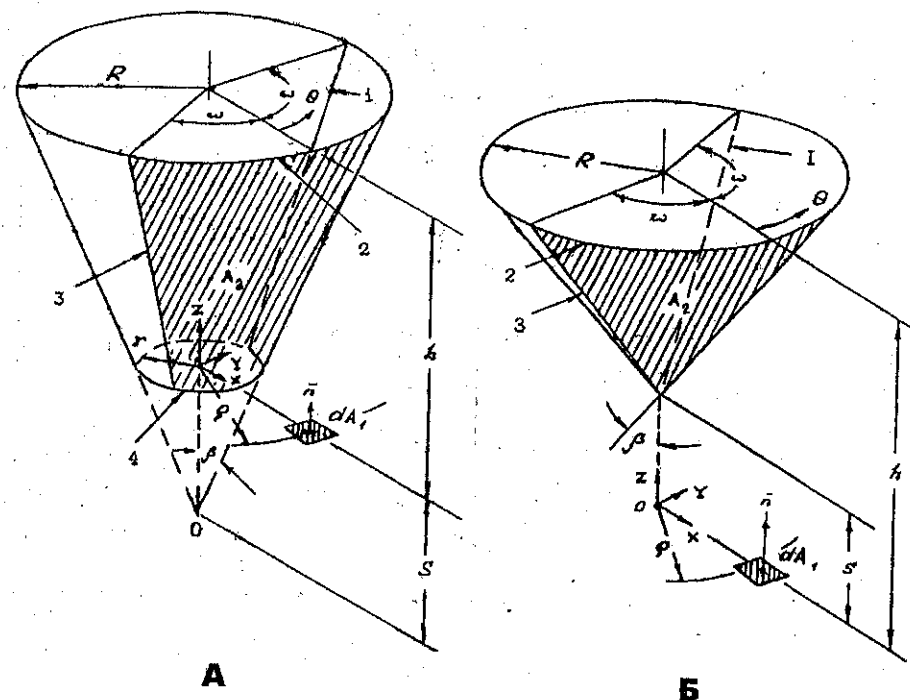


Рис. 17. К расчету излучения от пламени фонтанирующей скважины.

При отсутствии ветрового воздействия угловые коэффициенты облучения от пламени при его эквивалентировании конусной поверхностью могут быть вычислены аналитически [ 4 ] рис. 17. В плане практического приложения случай "А" можно интерпретировать как облучение единичных площадок на горизонтальных поверхностях технологического оборудования, приподнятых над поверхностью земли, а также как облучение горизонтальных объектов, расположенных на поверхности земли для случая начала отсчета истечения газа не с поверхности земли, а из кратера, образованного взрывом.

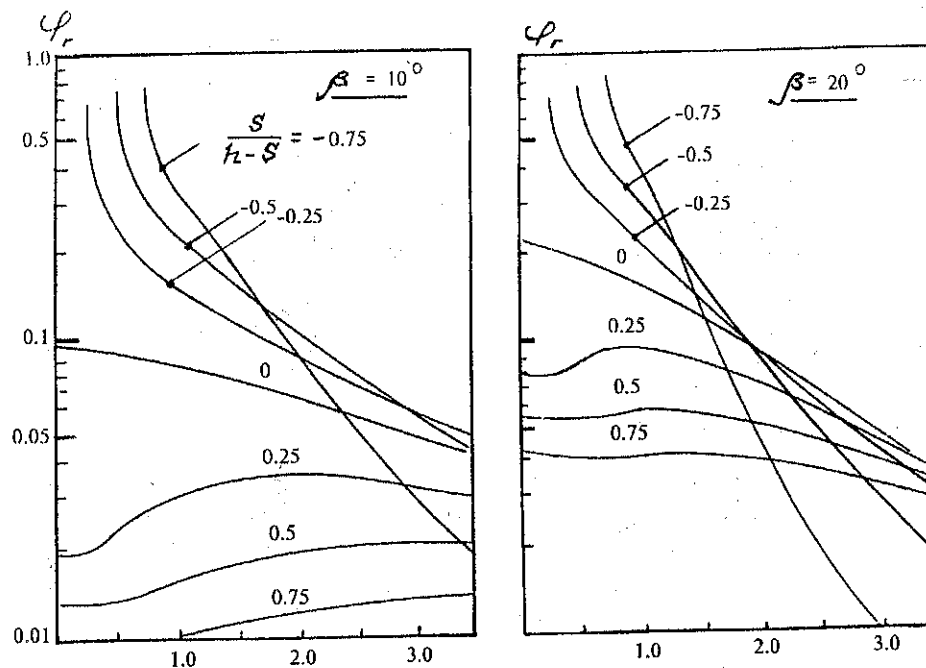
Значения соответствующих угловых коэффициентов представлены в виде номограмм на рис.18.

Особо следует остановиться на возможностях достоверного прогноза основных характеристик пожара при полном разрыве трубы и воспламенении газа на газопроводах.

С точки зрения потенциального воздействия на окружающую среду аварийное разрушение магистрального газопровода сопровождается:

- образованием волн сжатия за счет расширения в атмосфере природного газа, заключенного под давлением в объеме "мгновенно" разрушившейся части трубопровода (20-70 калибров), а также волн сжатия, образующихся при воспламенении газового шлейфа и расширении продуктов сгорания;





**Рис. 18.** Коэффициенты облучения единичной горизонтальной площадки от конусного поверхностного излучателя.

- образованием и разлетом осколков (фрагментов) из разрушенной части трубопровода;
- возможностью воспламенения газа и термическим воздействием пожара на окружающую среду.

Как показал анализ отечественной статистики, при разрушениях магистральных газопроводов пожар возникает в 50–55 % случаев. Причем источниками воспламенения газа являются искры, образующиеся при соударении друг с другом фрагментов трубы, либо при ударах о трубу "выдуваемых" высокоскоростными струями каменных включений грунта.

Вопросы, связанные с образованием волн сжатия при разрыве газопровода и воспламенении газового шлейфа, были исследованы А.Хоффом [5]. С помощью специальной высокоскоростной киносъемки было установлено, что при воспламенении смеси газа с воздухом происходит быстрое ("вспышкообразное") сгорание лишь малой части шлейфа. Основная же горючая масса не является гомогенной и сгорает со значительно меньшей скоростью ( $\approx 10$  м/с) и относительно беспорядочно по объему (отдельными зонами).

Как следствие, при разрушении трубы и зажигании газа формируется относительно слабая волна избыточного давления с амплитудой в пределах 0,15–0,20 бар в непосредственной близости (эпицентре) от места разрыва.

Для анализа потенциальной опасности механического воздействия фрагментов поврежденного трубопровода на окружающую среду были проанализированы материалы расследований крупных аварий на магистральных газопроводах СССР и РФ. Установлено, что разрушение трубопроводов с множественным образованием фрагментов (относительно незначительных размеров) происходило чаще всего на трубах из сталей с недостаточно высокими вязкостными характеристиками (17ГПС, 17ГПС-У). Именно из сталей этой группы было построено большинство трубопроводов диаметром 1020 мм, на долю которых приходится наибольшее число отказов и аварий. В дальнейшем, с переходом в основном к газопроводам с диаметром 1420 мм, требования к вязкостным характеристикам металла были значительно усилены. Как следствие, при аварийных разрушениях газопроводов  $D_y$  1400 мм происходит, в основном, либо "развальцовка" труб в пределах траншеи, либо образование 2–3 крупных фрагментов (иногда в виде "целых" секций труб). Дальность разлета таких фрагментов, как правило, составляет не более нескольких десятков метров. Таким образом, для трубопроводов  $D_y$  700–1200 мм (постройки 60–70-х годов) дальность разлета осколков может достигать значений 200–250 м, а для трубопроводов с  $D_y$  1400 мм (в основном из труб импортной поставки или отечественных с повышенными вязкостными характеристиками) – в пределах 150 м.

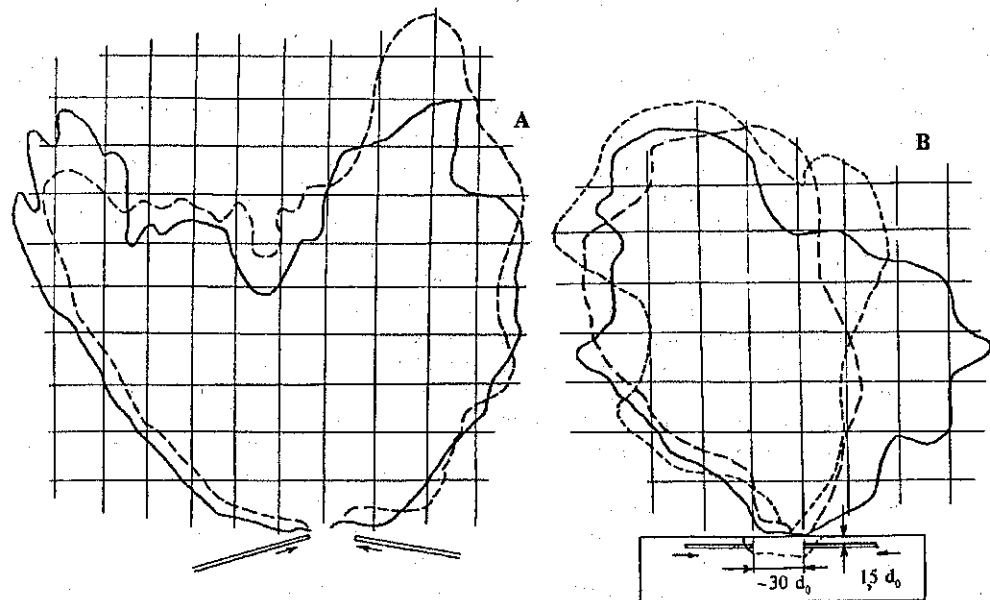
В рамках рассматриваемой проблемы представляет также непосредственный интерес вопрос о возможных размерах зон загазованности при разрушении магистрального газопровода высокого давления. Выполненные во ВНИИГАЗ'е расчеты [6] показали, что максимальные размеры пожароопасных зон обычно не превышают 250–300 м. В районах речных пойм или на болотах, т.е. на "слабонесущих" или "оторфованных" грунтах при разрушении газопровода концы труб могут быть значительно смещены вверх или вбок относительно исходной оси. Как следствие, истечение двух звуковых струй может протекать в принципе независимо друг от друга. В этом случае зона загазованности по направлению истечения для горизонтальной струи газа из трубопровода с  $D_y$  1400 мм может возрасти до 600–800 м.

Как было отмечено выше, примерно в половине случаев аварийного разрушения магистральных газопроводов происходит воспламенение газа непосредственно в месте разрыва. Характер горения газа и масштабы воздействия пожара на окружающую среду зависят от большого числа и конкретного сочетания целого ряда факторов, среди которых можно указать:

- рабочее давление газа и диаметр газопровода (потенциальный запас энергии, интенсивность выброса газа);
- отклонение оси трубопровода к моменту разрушения от проектного положения, а также уровень и характер концентрации напряжений в месте разрушения;
- плотность грунта засыпки, а также свойства коренного массива грунта (диаметр образовавшегося "котлована"; взаимное положение осей концов труб, регулирующее поле газодинамического течения газа);

В рамках исследования этой проблемы ВНИИГАЗ'ом совместно с ВНИИЭФ (Арзамас-16) были проведены газодинамические расчеты симметричного взаимодействия двух звуковых струй газа при наличии ограничивающих поверхностей (траншеи), а совместно с ВНИИПО МВД РФ – выполнены специальные модельные эксперименты по изучению особенностей горения двух встречных звуковых струй метана при самых различных вариантах образования "котлована" и различной ориентации в пространстве осей двух концов труб. Эксперименты и расчеты показали, что газодинамические и calorиметрические характеристики факела, его конфигурация и пространственная ориентация, а следовательно и уровень теплового воздействия на

окружающую среду весьма неоднозначны и зависят от большого числа факторов. В качестве иллюстрации на рис.19 показано изменение (в вертикальной проекции) контура пламени при отклонении осей концов труб от горизонтали, а также - при взаимодействии горизонтальных струй в траншее.



**Рис. 19.** Конфигурация пламени метана при взаимодействии встречных звуковых струй: А - при угле наклона к горизонту  $10^\circ$ ; В - при взаимодействии в грунтовом котловане.

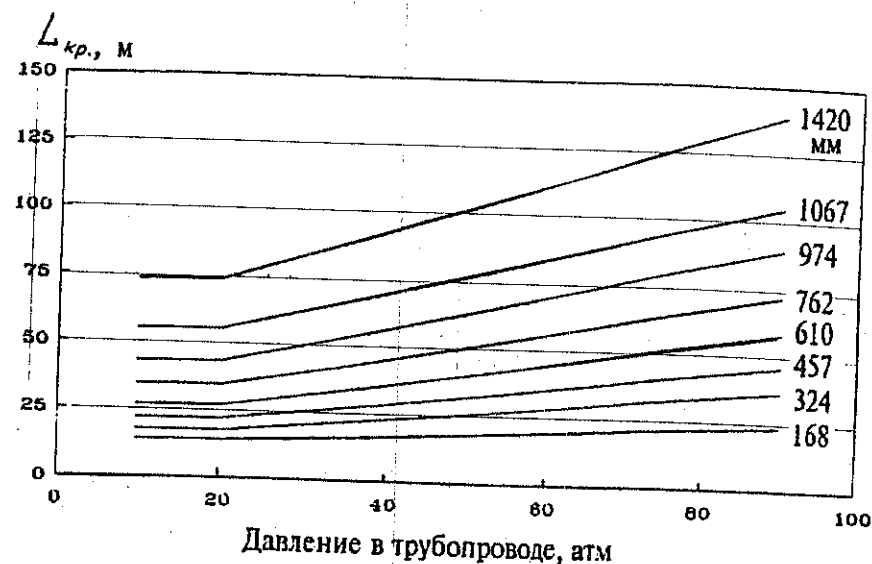
Как показали натурные исследования фирмы "Бритиш Газ" [7], тепловое воздействие пожара на поверхность грунта на различных удалениях от очага горения пропорционально комплексу

$$q_x \sim \frac{Pd_0^2}{x^n},$$

где показатель степени "n" зависит от конфигурации пламени ("фактора видения") и изменяется в диапазоне  $1 \leq n \leq 2$  (причем для большей части проведенных экспериментов  $1,3 \leq n \leq 1,6$ ).

Из приведенной формулы следует, что при прочих равных условиях масштабы теплового воздействия на окружающую среду пожаров на газопроводах с  $D_y 700-1000$  мм,  $P_{\text{роб}} = 55$  ат и  $D_y 1400$  мм,  $P_{\text{роб}} = 75$  ат могут отличаться в 5 - 6 раз.

Для инженерного прогноза возможных зон термического поражения людей при пожарах на газопроводах нами рекомендуются данные фирмы "Бритиш Газ", полученные по результатам обработки большой серии натурных экспериментов и представленные на рис.20 в виде зависимости некоторого критического "расстояния удсления" от диаметра трубопровода и рабочего давления. "Критическое" расстояние характеризует собой радиус круга, на границе которого удельный тепловой поток на поверхности грунта составляет  $32 \text{ кВт/м}^2$ . Как показано в главе IV, этот уровень с точки зрения поражения людей может рассматриваться как нижний предел (1 % поражения).



**Рис. 20.** Влияние технологических параметров трубопровода на размеры зоны термического поражения ("British Gas").

Результаты обобщения фактических последствий от разрушения газопроводов и воспламенения газа на территории бывшего СССР даны [8] в таблице 13.

Таблица 13

Диаметр, мм	530	720	820	1020	1220	1420
Размеры котлована, м	28×15×4,5	35×12×5	60×15×4	106×30×12	49×22×12	65×40×10
Радиус термического воздействия, м	250	195	244	244	275	188
Потери газа, млн. м3	2,2	2,3	1,8	7,3	11	13,9

Средний экологический ущерб на один отказ магистрального газопровода, оцененный за 10-летний период наблюдений (1980 - 1990 гг), составил:

- уничтожение сельхозугодий - 78 га;
- вывод из потребления пахотной земли - 6,2 га;
- уничтожение лесных угодий - 47,5 га

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Kalghati G.* The visible shape and size of a turbulent hydrocarbon jet diffusion flame in a cross-wind // *Combustion and Flame*, 1983; v.52, p.91-106.
2. *Chamberlain G.* Developments in design methods for predicting thermal radiation from flames // *Chem. Eng. Des.*, 1987, v.65, p.299-309.
3. *Mudan K.* Thermal radiation hazard from hydrocarbon pool fires // *Prop. Energy and Combust. Sci.*, 1984, 10,1, p.59-80.
4. *C.P. Minning* Calculation of Shape Factors Between Rings and Inverted Cones Sharing a Common Axis Transaction of the ASME, J. of Heat Transfer Aug., 1977, vol. 99, pp 492-494
5. Hoff A.M. An Experimental Study of the Ignition of Natural Gas in a Simulated Pipeline Rupture - "Combustion and Flame" 1983,49, 51-55.
6. А.С.Едигаров, В.А.Сулейманов "Математическое моделирование аварийного истечения и рассеивания природного газа при разрыве газопровода", Математическое моделирование, т.7, № 4, 1995, с.37-52
7. N.A. Townsend and G.Fearnehough. "Control of Risk From UK Gas Transmission Pipelines" - Presented at the 7th Symposium on Line Pipe Research.
8. *Мазур И.И., Иванцов О.М., Молдаванов О.И.* Конструктивная надежность и экономическая безопасность трубопроводов. М., Недра, 263с.

## 3.2.МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ НА ОБЪЕКТАХ СЖИЖЕННОГО ГАЗА

Рассматриваемые в настоящем подразделе математические модели описывают поведение так называемых "термодинамически нестабильных" жидкостей, которые могут существовать в однофазном состоянии только в пределах строго определенных значений температуры и давления. В зависимости от степени отклонения исходных термодинамических параметров и скорости протекания этого процесса происходит частичное или полное фазовое превращение (вскипание) жидкости.

В рамках этой общей классификации мы имеем две группы процессов:

1. Постепенное опорожнение сосуда (аппарата) при частичной разгерметизации его корпуса или соединительных патрубков (фланцев) или же истечение жидкости из "протяженного" трубопровода за конечный промежуток времени при его разрушении на полное сечение (при частичной разгерметизации). При этом происходит нарушение термодинамической стабильности уже в самой системе и двухфазное истечение нестабильной жидкости в атмосферу с дальнейшим ее испарением в окружающей среде со скоростью, определяемой интенсивностью внешнего теплообмена.
2. "Мгновенное" ("взрывное") вскипание сразу всего объема "сильно" термодинамически перегретой жидкости в сосуде или аппарате при значительном нарушении его герметичности с последующим резким возрастанием давления и полным разрушением сосуда с очевидной предрасположенностью к воспламенению и далее к интенсивному сгоранию расширяющегося аэрозольного облака переобогащенной топливно-воздушной смеси (эффект "BLEVE").

Исходя из отмеченных положений необходимо провести:

1. Анализ гидрогазодинамических эффектов и расчет интенсивности и динамики истечения двухфазного потока при разгерметизации магистральных и технологических трубопроводов.
2. Расчет динамики растекания термодинамически нестабильной жидкости по дну и поверхности (грунт, строительные покрытия) и ее дальнейшего нестационарного испарения под действием внешнего теплопритока от грунта (покрытий) и атмосферы.
3. Исследование специфики формирования облака "тяжелых" (относительно воздуха) в основном углеводородных паров из "наземного" источника и динамики его рассеивания под действием гравитационных и турбулентных процессов в приземном слое атмосферы.
4. Анализ условий и специфики взрывного сгорания облака паров в различных режимах (дефлаграция, детонация) и расчет масштабов барического и термического воздействия взрыва на окружающую среду.

### 1. Истечение (нестабильных) сжиженных газов из трубопроводов \*

С точки зрения потенциальных объемов истечения жидкости и масштабов негативного воздействия на окружающую среду должны в первую очередь рассматриваться магистральные трубопроводы. Согласно имеющимся исследованиям харак-

\*1 раздел подготовлен совместно с В.А. Сулеймановым

терный спектр повреждений герметичности магистральных трубопроводов включает:

- одиночные коррозионные сквозные дефекты с условным диаметром отверстия до 8-12 мм и интенсивностью утечки (под высоким давлением) до 10-15 м<sup>3</sup> / час;
- усталостные трещины с линейными размерами, как правило, меньшими или равными одному калибру и отношением длины к максимальной ширине раскрытия в пределах 8-10 ;

- разрывы трубопровода условно на полное сечение ("гиловитного типа") в результате, например, механического воздействия землеройной техники. При такой постановке задачи истечение продукта происходит независимо из двух участков продуктопровода вверх и вниз по течению, а суммарный расход определяется как удвоенный поток из одной трубы с полностью открытым торцом.

С точки зрения потенциальных масштабов поражения последний сценарий аварии представляет наибольший интерес, хотя и носит больше гипотетический характер.

Математическое моделирование динамики истечения сжиженного углеводородного газа (СУГ) при разрыве продуктопровода в полной постановке представляет собой сложную задачу, для точного решения которой имеющейся в настоящее время экспериментальной информации о термодинамических свойствах смеси, кинетике парообразования, поверхностных эффектах и динамике межфазного взаимодействия явно недостаточно.

Однако, ситуация может быть значительно упрощена, если принять в соответствии с современными представлениями о характере аварийного опорожнения трубопровода с нестабильной жидкостью, что на первом этапе истечение значительной части массы продукта происходит в режиме, когда скорость потока лимитируется пропускной способностью концевой участка трубы, т.е. когда трубопровод работает в режиме "запирания" [1-5]. Как следствие, интенсивность аварийного истечения остается величиной примерно постоянной.

Следующий этап процесса наступает после перекрытия аварийного участка с помощью линейных запорных устройств.

В соответствии с принятой гипотезой о двухстадийности процесса аварийного истечения СУГ рассмотрим последовательно указанные этапы опорожнения при разрыве магистрального продуктопровода.

1. При "мгновенной" разгерметизации продуктопровода вверх и вниз по потоку распространяется волна гидравлической "разгрузки", за фронтом которой возрастает удельный объем вещества, а жидкость, получая соответствующий импульс, ускоряется. При дальнейшем фазовом переходе жидкости происходит распад первичной волны разгрузки и появляется более "слабая" волна парообразования, которая следует за первой волной. Лидирующая ("сильная") волна распространяется по однофазной жидкости со скоростью звука "С<sub>о</sub>", которая с учетом упругости стенок трубы может быть определена по известному уравнению:

$$C_o = \frac{1}{\sqrt{\rho \left( \frac{1}{\beta} + \frac{d_o}{\delta E} \right)}}, \quad (3.46)$$

где  $\rho$  - плотность транспортируемого продукта в жидком состоянии;  $\beta$  - модуль упругости СУГ в жидком состоянии;  $d_o$ ,  $\delta$  и  $E$  - диаметр трубы, толщина ее стенки и модуль упругости материала труб соответственно.

В качестве примера для СУГ, транспортируемого в жидком состоянии ( $\rho=560 \text{ кг/м}^3$

при  $T_o=10^\circ\text{C}$ ,  $\beta=240 \text{ МПа}$ ) по трубопроводу диаметром 426 x 8 мм, величина  $C_o$  составляет  $\approx 600 \text{ м/с}$ . За фронтом этой волны скорость движения однофазной жидкости увеличивается и определяется из условий сохранения импульса и потока вещества:

$$W = W_o + \frac{P_o - P_{\text{нас}}(T_o)}{\rho C_o}, \quad (3.47)$$

где  $P_o$  и  $W_o$  - начальные значения давления и скорости в потоке до разрыва продуктопровода, а  $P_{\text{нас}}(T_o)$  - давление насыщения СУГ при температуре продукта на глубине заложения трубопровода.

После разрыва на срезе трубы устанавливается и сохраняется в течение некоторого периода времени давление, незначительно меньшее (на 0,05-0,1 МПа) соответствующего давления насыщения жидкости, а на расстоянии нескольких калибров (диаметров трубы) от сечения разрыва - равное давлению насыщения при соответствующей температуре транспортируемого продукта. При этом расход двухфазного СУГ (на единицу площади) -  $\bar{G}_{\text{кр}}$  в сечении разрыва будет ограничен по своему максимальному значению термодинамикой фазового перехода. Его можно рассчитывать, например, либо по формуле Фауске (из "Методики определения физических последствий при утечке опасных веществ" Нидерландской фирмы "TNO", одной из ведущих в области промышленной безопасности)

$$\bar{G}_{\text{кр}} = \left( \frac{dP}{dT} \right)_{\text{нас}} \sqrt{\frac{T}{C_p}}, \quad (3.48)$$

либо по известной формуле Генри-Фауске [4]

$$\bar{G}_{\text{кр}}^2 = -\frac{\bar{\chi}}{\rho_g^2} \frac{d\rho_g}{dP} - \frac{(1-\bar{\chi})}{\rho_l^2} \frac{d\rho_l}{dP} + \left( \frac{1}{\rho_g} - \frac{1}{\rho_l} \right) \frac{(1-\bar{\chi})}{S_g - S_l} \frac{dS_l}{dP} + \bar{\chi} \frac{dS_g}{dP}. \quad (3.49)$$

В уравнениях (3.48)-(3.49):  $P$  и  $T$  - давление и температура транспортируемого продукта;  $C_p$  - его удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $\rho_g(\rho_l)$  - плотность газовой (жидкой) фазы;  $S_g(S_l)$  - энтальпии газа (жидкости); а  $\bar{\chi}$  - объемное газосодержание.

При выводе формул (3.48) и (3.49) использовалось предположение о гомогенности двухфазного потока в непосредственной близости от сечения разрыва и о его нахождении в состоянии термодинамического равновесия.

Для СУГ в характерном для магистральных трубопроводов диапазоне изменения  $P$  и  $T$  расчеты критического расхода по формулам (3.48) и (3.49) дают близкие значения, равные в среднем 2500 кг/(м<sup>2</sup>.с). Критические скорости истечения двухфазного СУГ составляют при этом около 4,5 м/с, т.е. в 4-5 раз превышают скорости перекачки однофазного СУГ в номинальных стационарных режимах. При этом расчетная скорость истечения СУГ из сечения порыва значительно ниже скоростей притоков продукта к месту разрыва (см. формулу (3.47), вызванных прохождением "сильной" волны. Вследствие этого в трубопроводе на участках, прилегающих к месту разрыва, происходит своеобразное торможение ускоренных объемов жидкости между сечением разрыва и фронтом "сильной" волны. Именно поэтому и наблюдается в

течение определенного интервала времени истечение жидкости с постоянным расходом в так называемом "режиме запирания". В этих условиях вторая "слабая" волна, ответственная за процесс разгазирования транспортируемого продукта, не может сразу "проникнуть" вглубь трубопровода.

Одним из ключевых является в данной проблеме вопрос о физических предположках и технических возможностях своевременной и правильной идентификации оператором на насосной станции (НС) факта и места аварийного разрыва, а также - вопрос о последующем принятии необходимых мер по прекращению перекачки и отсечению аварийного участка.

Для расчета нестационарных гидравлических процессов в трубопроводе при возникновении в месте разрыва гидравлического импульса нами апробирована и рекомендуется для методического анализа алгоритмическая программа на основе численного интегрирования методом характеристик системы дифференциальных уравнений, описывающих одномерное изотермическое неустановившееся движение однофазной сжимаемой жидкости вдоль оси  $x$  трубопровода [9]

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{P}{\rho} \right) + W \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\rho} \right) + C^2 \frac{\partial W}{\partial x} = 0 \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\rho} \right) + W \frac{\partial W}{\partial x} + \lambda \frac{W|W|}{2d} = 0 \quad (3.51)$$

при следующих условиях на момент времени  $\tau \geq 0$ :

- давление в сечении разрыва равно давлению насыщения при температуре перекачки -  $P(x^*) = P_{\text{нас}}(T)$ ;
- скорость аварийного истечения в месте разрыва равна "критической" (из условий запирания потока по Фауске), т.е.  $W(x^*) = W_{\text{max}} = \text{const}$  в течение всего периода формирования определенного отклика (падения давления) на НС вверх по потоку;
- давление на всасе НС, подающей жидкость в аварийный участок, сохраняется неизменным с помощью регулятора давления типа "до себя", причем напорная характеристика насосной станции может быть аппроксимирована известной функцией

$$H = a - bQ^2, (Q = WF).$$

В качестве иллюстрации на рис.21, 22 для трубопровода  $D_400$  длиной 250 км представлены расчеты изменения давления на нагнетании НС вверх по потоку от точки разрыва на полное сечение (исходное давление нагнетания - 64 бар, давление на всасе - 15 бар), а также влияния интенсивности утечек стандартного ШФЛУ (ТУ 38-101524-93) на инерционность падения давления. Заметим, что возникновение аварийной утечки из трещины не меняет общее направление потока.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что даже в случае адекватных и своевременных действий оператора на НС по прекращению перекачки, вследствие относительно высокой инерционности гидродинамических процессов в магистральном трубопроводе объемы аварийных выбросов (в напорном режиме) могут быть весьма значительны (несколько сот тонн). Это однозначно свидетельствует о необходимости установки автоматизированных систем прекращения перекачки и отсечения аварийного участка при разрыве.

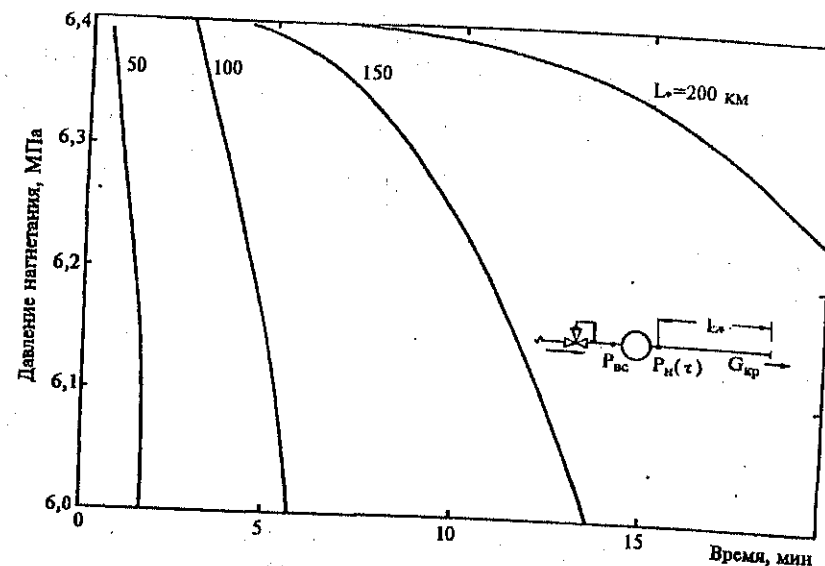


Рис. 21. Динамика падения давления нагнетания на НС при аварийном разрыве продуктопровода на полное сечение.

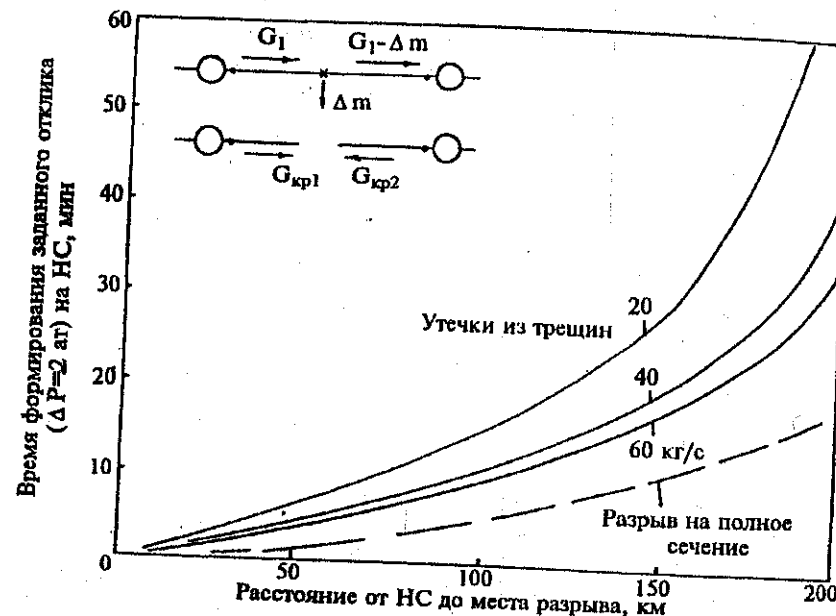


Рис. 22. Влияние интенсивности утечки на инерционность формирования "отклика" на НС.

2. Вторая расчетная стадия рассматриваемого процесса опорожнения магистрального продуктопровода при его разрыве начинается с момента перекрытия аварийного участка с обоих концов запорными устройствами. Для расчета этого процесса нами предлагается к использованию модификация американской методики "МБЛ" [3].

Гидравлика движения двухфазного потока определяется из обобщенного уравнения Бернулли:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\Psi}{2d_0 \rho_t} \bar{G}_{кр}^2 \quad (3.52)$$

где для всех  $0 < x < 1$  приведенный коэффициент гидравлического сопротивления  $\Psi$  задается соотношением:

$$\Psi = \lambda \left[ (1 - \bar{x}) + \frac{\bar{x}}{k} \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_g}} \right]^2 \quad (3.53)$$

В уравнениях (3.52)-(3.53):  $k$  - коэффициент скорости (скольжения фаз);  $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления Дарси-Вейсбаха, рассчитываемый по движению транспортируемого продукта в однофазном (жидком) состоянии с эквивалентным расходом;  $\bar{G}_{кр}$  - критический массовый расход, рассчитанный по формуле Генри-Фауске.

При выводе (3.52)-(3.53) использовались следующие предположения о характере движения двухфазных потоков и соотношениях между основными параметрами:

- двухфазный поток характеризуется так называемым "стержневым" типом течения, когда каждая из двух фаз имеет свою среднюю истинную объемную скорость;
- коэффициент скорости принимается равным

$$k = 0,4 + 0,6 \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_g}} \sqrt{\frac{1 + 0,4 \frac{1 - \bar{x} \rho_g}{\bar{x} \rho_t}}{1 + 0,4 \frac{1 - \bar{x}}{\bar{x}}}} \quad (3.54)$$

-истинное объемное газосодержание " $\alpha$ ", т.е. часть сечения трубопровода, занятая газовой фазой, связано с массовым расходным газосодержанием " $\bar{x}$ " как

$$\alpha = \frac{\bar{x}}{\bar{x} + k(1 - \bar{x}) \frac{\rho_g}{\rho_t}} \quad (3.55)$$

Пределы интегрирования уравнений (3.52)-(3.53), проводимого с помощью метода трапеций с 10 пространственными узлами, изменяются от сечения разрыва с давлением  $P_0$  до сечения с координатой  $x^i$ , которое в текущий момент времени  $t$  находится на границе двухфазной и жидкой сред, где давление равно давлению насыщения  $P_{нас}$ , а расход сохраняет свое начальное значение  $G_0$ .

$$G = \bar{G}_{кр}^i + \frac{G_0 - \bar{G}_{кр}^i}{x^i} x \quad (3.56)$$

В этом приближении интегрирование уравнения (3.52) приводит к следующему текущему значению координаты

$$x^i = \frac{6d_0 \rho_t}{\lambda \bar{G}_{кр}^i{}^2 \left[ 1 + \frac{G_0}{\bar{G}_{кр}^i} + \left( \frac{G_0}{\bar{G}_{кр}^i} \right)^2 \right]} \int_{P_0}^{P_{нас}} \frac{dP}{\Psi} \quad (3.57)$$

Объем, занятый в данный момент времени  $t_i$  газовой фазой на сегменте, определяется интегралом уравнения:

$$dV_g^i = \alpha F dx^i \quad (3.58)$$

где  $F$  - площадь поперечного сечения трубы.

Интегрируя это уравнение аналогично тому, как было проинтегрировано уравнение (7), получаем для величины "газового" объема  $V_g^i$  на текущий момент времени  $t_i$  следующее выражение

$$V_g^i = \frac{6d_0 F \rho_t}{\lambda \bar{G}_{кр}^i{}^2 \left[ 1 + \frac{G_0}{\bar{G}_{кр}^i} + \left( \frac{G_0}{\bar{G}_{кр}^i} \right)^2 \right]} \int_{P_0}^{P_{нас}} \frac{\bar{x} dP}{\Psi \sqrt{\Psi}} \quad (3.59)$$

Объем, занимаемой жидкой фазой на "газожидкостном" участке  $x^i$ , будет составлять

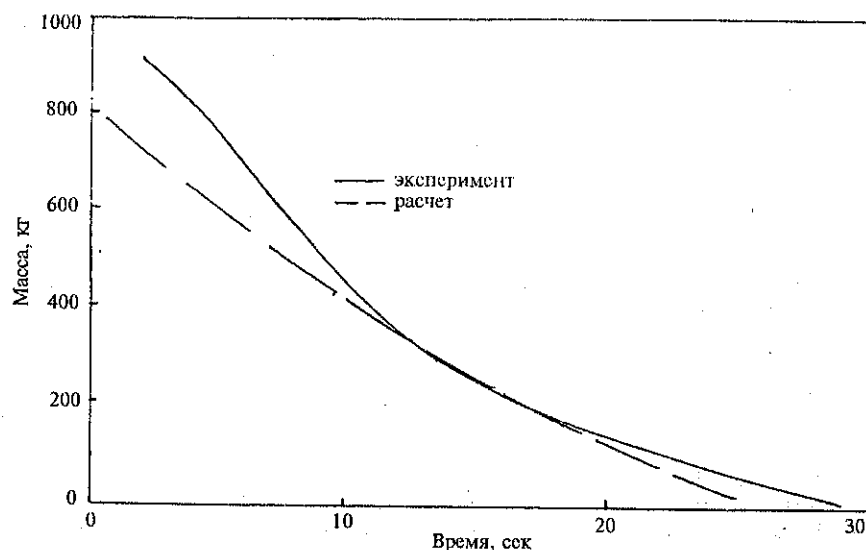
$$V_l^i = x^i F - V_g^i \quad (3.60)$$

Зная значения объемов  $V_g^i$  и  $V_l^i$ , усредненные по длине  $x^i$  значения плотностей газовой и жидкой фаз, можно рассчитать значение массы  $M^i$  продукта, остающейся в аварийном участке продуктопровода в момент времени  $t_i$ .

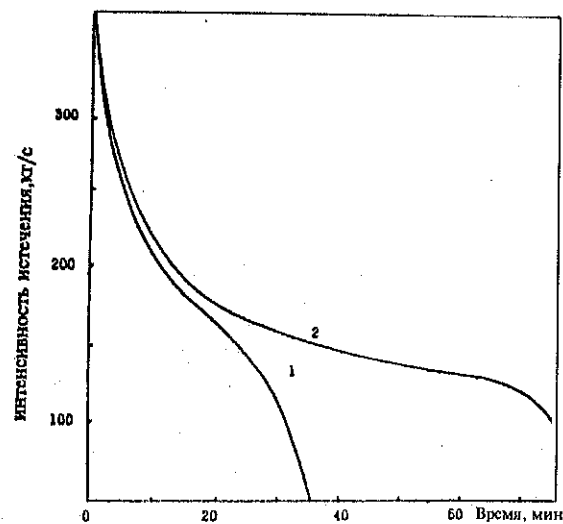
На основе описанной методики во ВНИИГАЗе разработана алгоритмическая программа для проведения соответствующих расчетов на ЭВМ, включающая в себя подпрограмму по расчетам фазовых равновесий и термодинамических свойств транспортируемого сырья в форме Редлиха-Квонга.

Для оценки точности модели было проведено сравнение расчетных результатов с данными полномасштабного промышленного эксперимента, выполненного компаниями "Бритиш Петролеум" и "Шелл" на полигоне Грейн (Кент, Англия) [6] рис. 23. Сравнение свидетельствует об удовлетворительном согласовании результатов.

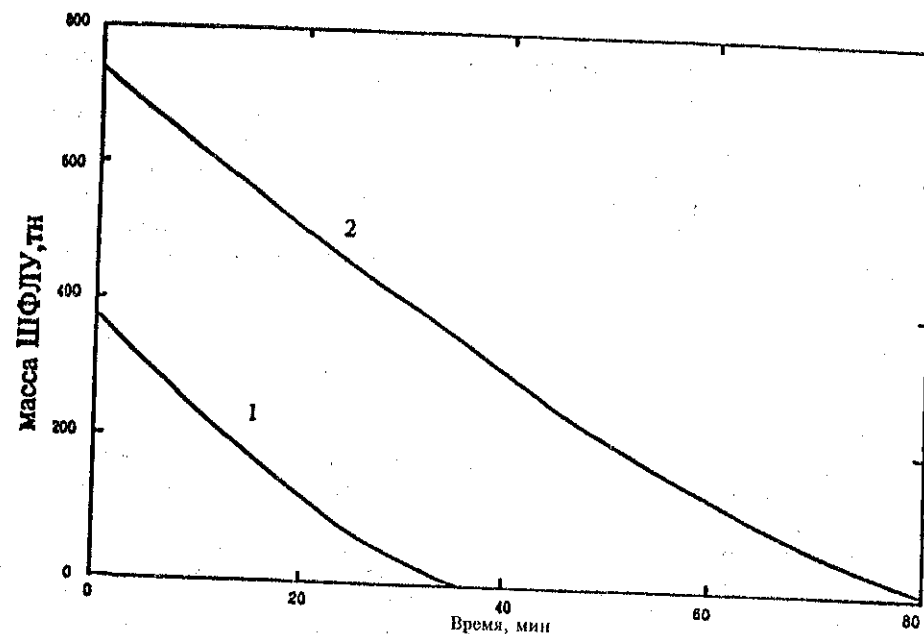
В качестве иллюстрации на рис. 24, 25 представлена динамика опорожнения отсеченного с одного конца участка трубопровода Д400 при истечении ШФЛУ из разрыва на полное сечение.



**Рис. 23.** Изменение массы сжиженного пропана в перекрытом с одного конца участке трубопровода при его аварийном опорожнении.



**Рис. 24.** Динамика истечения ШФЛУ в атмосферу из перекрытого с одного конца участка трубопровода различной длины (1 - 5 км, 2 - 10 км).



**Рис. 25.** Изменение массы ШФЛУ в перекрытом с одного конца участке трубопровода  $D_y$  400 мм различной длины (1 - 5 км, 2 - 10 км).

Выше рассмотрена двухстадийная схема расчета аварийного опорожнения магистральных трубопроводов сжиженных углеводородных газов (нестабильного конденсата) с характерными параметрами:  $D_y = 300 - 500$  мм;  $P_{\text{мox}} = 45-65$  бар;  $P_{\text{мин}} = 10-15$  бар; расстояния между насосными станциями 100-300 км; расстояния между линейными задвижками, как правило, 10-20 км; время перекрытия потока после подачи соответствующего сигнала на электропривод задвижки - не менее 1 минуты; вероятность срабатывания линейной арматуры - не более 0,5.

Из представленных данных следует, что гидродинамические процессы в магистральных трубопроводах объективно характеризуются высокой инерционностью и ограниченными возможностями оперативной диагностики и локализации аварий.

В отличие от магистральных трубопроводов технологические трубопроводы объектов производства, хранения и распределения сжиженных углеводородных газов характеризуются в основном относительно небольшими диаметрами (50 - 200 мм) и меньшими значениями давлений при хранении и транспортировке (5 - 15 ат), а также длинами в пределах от нескольких сотен до нескольких тысяч калибров ( $L/d_0$ ).

Весьма важным является то обстоятельство, что подобные трубопроводы находятся, как правило, под постоянным визуальным контролем операторов, а в качестве систем оперативной безопасности используются установленные с интервалом 200-500 м малоинерционные электромагнитные отсекатели с возможностью подачи со-

ответствующей команды как с центрального диспетчерского пункта, так и "по месту".

Гидродинамика истечения сжиженных газов из технологических трубопроводов к настоящему времени достаточно хорошо изучена экспериментально.

Для расчета интенсивности истечения типовых сжиженных углеводородов (пропан-бутановых смесей) нами рекомендуется корреляция ВНИИПО МВД РФ, полученная на основании обработки многочисленных зарубежных и собственных экспериментальных данных в диапазоне изменения диаметров трубопровода - до 50 мм; относительной длины трубопровода - до 1000 калибров; давления насыщенных паров - до 10 ат; абсолютного давления (включая избыточное давление наддува) - до 20 ат.

$$G = \frac{n_1 F \sqrt{2(P - P_s) \rho_l}}{\left(\frac{L}{d_0}\right)^{n_2}} \quad (3.61)$$

В формуле (3.61):  $F$  - площадь сечения трубы в месте истечения (разрыва),  $m^2$ ;  $G$  - массовый расход,  $kg/s$ ;  $\rho_l$  - плотность жидкости  $kg/m^3$ ;  $L$  и  $d_0$  - длина и диаметр трубопровода,  $m$ .

Для случая истечения двухфазной жидкости под давлением насыщенных паров из отсеченного с одного конца участка трубопровода:  $P^*$  - давление насыщения при температуре окружающей среды,  $n/m^2$ ;  $n_1 = 0,4$ ;  $n_2 = 0,23$ .

Для определения доли пара в истекающем потоке может быть использовано подтвержденное экспериментально положение о равновесном испарении при изотальпийном сбросе давления.

Для случая истечения сжатого газа через протяженный трубопровод из емкости под избыточным давлением:  $P^*$  - абсолютное давление в емкости,  $n/m^2$ ;  $n_1 = 2$ ;  $n_2 = 0,3$ .

Как уже отмечалось, большой объем экспериментальных исследований по динамике опорожнения отсеченного с одного конца участка трубопровода с находящимся под давлением сжиженным углеводородным газом, а также из отверстий в теле трубы был проведен компаниями "Бритиш Петролеум" и "Шелл" на полигоне Грейнд (Англия) [6]. Диапазон изменения давлений и температур в трубопроводе - 7,5-22 бар и 14-24 °C; диаметров - 50-150 мм; отношение площади отверстия (истечения) к площади сечения трубопровода - 0,04-1,0; длина экспериментального участка - 100 м.

Динамика изменения массы жидкости в контрольном участке при истечении из различных отверстий или при раскрытии трубопровода на полное сечение описывалась простым дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial M(\tau)}{\partial \tau} = \bar{\beta} M(\tau) \quad (3.62)$$

в котором эмпирический коэффициент -  $\bar{\beta}$  (постоянная времени,  $1/c$ )

$$\bar{\beta} = \bar{d}_0^{0,23} [0,22 \bar{F} - 0,13 \bar{F}^{1,5} + 0,00068(T - 15)]$$

где  $\bar{F}$  - отношение площади отверстия к площади поперечного сечения трубы;

$$\bar{d}_0 = \frac{d_0}{50}, \text{ где } d_0 \text{ диаметр трубы в мм; } T - \text{температура жидкости, } ^\circ C.$$

Решение уравнения (3.62) при соответствующих начальных условиях дает простую экспоненциальную функцию, обеспечивающую хорошее согласование с экспериментом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нигматуллин Р.П. Динамика многофазных сред. т.1, М.: Наука, 1987, 464с.
2. Гриценко А.И., Клапчук О.В., Харченко Ю.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах - М.: Недра, 1994, - 239с.
3. Morrow T.B., Bass R.L., Lock J.A. An LPG Pipeline Break Flow Model//J. of Energy Resources Technology. 1983, V.105, No9, p. 379-387
4. Чисхолм Д. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках - М. Недра, 1986, 205с.
5. Фокс Дж.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах - М.: Энергоиздат, 1981, 248с.
6. Tam V.H.Y. and Cowley L.T. Consequences of Pressurised LPG Releases: The Isle of Grain Full Scale Experiments//Proceedings of the GASTECH 88 Conference, Kuala Lumpur, 1988, V.1, Session 4, Paper 3.
7. А.П.Федотов, А.М.Чугуев, Н.В.Попов, Н.В.Куликов "Двухфазное истечение и горение сжиженных углеводородных газов при разрушениях трубопроводов", 1-ый международный семинар "Пожаро-взрывоопасность веществ, взрывопожаро-рози-та объектов", М., 14-21 июля 1995 г.



## 2. Растекание и испарение сжиженных газов на поверхности грунта (строительных покрытий) \*)

При аварийной разгерметизации сосудов или трубопроводов происходит истечение под давлением сжиженного газа и "мгновенное" испарение в окружающем пространстве определенной его части. При этом за счет изоэнтальпийного расширения (дросселирования) оставшаяся часть жидкости охлаждается относительно исходной (в рабочих условиях) температуры и растекается по дневной поверхности. Поскольку при атмосферном давлении охлажденный сжиженный газ переходит уже в новое равновесное (насыщенное) состояние, любой подвод тепла из окружающей среды приводит к дальнейшему испарению части его массы с одновременным изменением компонентного состава смеси за счет преимущественного ("фракционного") испарения наиболее высококипящих компонентов.

Таким образом, массовая интенсивность испарения сжиженного газа при аварийном истечении определяется тремя факторами: резким падением давления, теплопритоком из массива грунта (от строительного покрытия) и турбулентно-диффузионным потоком тепла из атмосферы.

а) парообразование вследствие падения давления

Для однокомпонентной жидкости доля равновесного испарения за счет сброса давления может быть определена с помощью стандартной "T-S" диаграммы в предположении изотермического перехода из рабочей точки "А" в точку "В" (атмосферное давление) - см рис.26.

При отсутствии термодинамических диаграмм величину испарения  $\Delta m$  (кг) можно рассчитать из уравнения:

$$\Delta m = 1 - \exp\left(\frac{C_p \Delta T}{\sigma}\right), \quad (3.63)$$

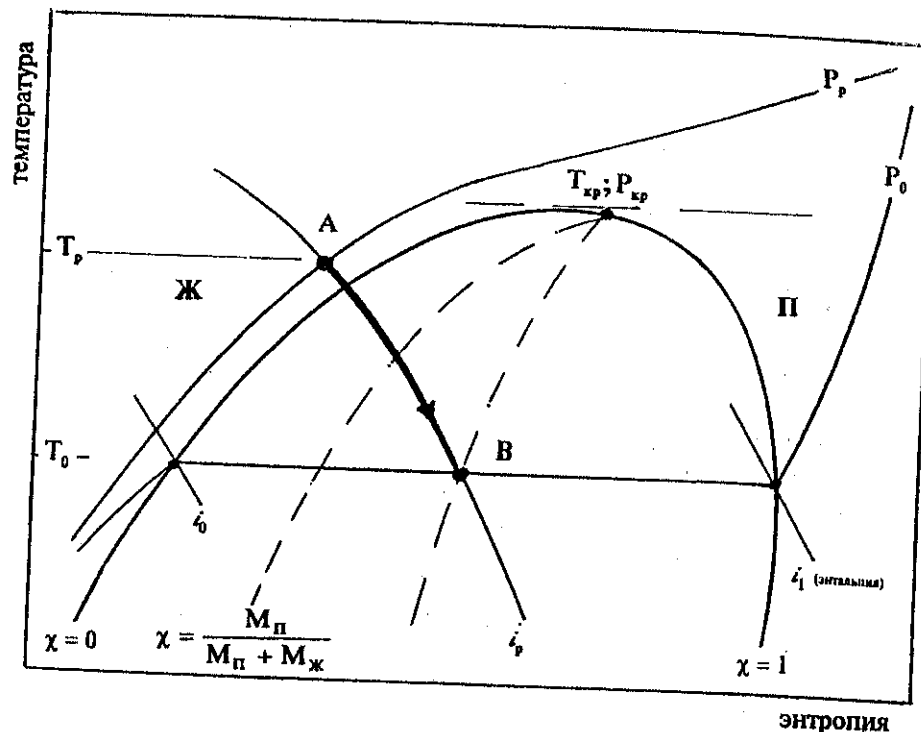
где  $C_p$ ,  $\sigma$  - осредненные в соответствующем диапазоне изобарная теплоемкость и теплота испарения жидкости;  $\Delta T = T_p - T_0$  - величина "переохлаждения" жидкости относительно исходных температуры и давления.

Для многокомпонентных сжиженных газов (например, ШФЛУ) в процессе сброса давления будет происходить преимущественное испарение наиболее "легкокипящих" компонентов и значительные изменения исходного компонентного состава паровой и жидкой фаз, что оказывает непосредственное влияние как на долю испарения смеси, так и на величину ее переохлаждения. Для расчета фазовых равновесий углеводородных смесей нами рекомендуется использовать соответствующие термодинамические модели на базе уравнения состояния Редлиха-Квонга.

б) парообразование за счет теплопритока от "подстилающей" поверхности

Для объективного учета факторов, оказывающих непосредственное влияние на интенсивность поступления паров в атмосферу, целесообразно провести следующую условную классификацию вариантов разлива:

<sup>\*)</sup> раздел подготовлен совместно с А.С. Едигаровым, О.К. Андроновой



**Рис. 26.** Диаграмма фазовых состояний однокомпонентного вещества в координатах "температура-энтропия".

1. Разлив сжиженного газа на площадки, имеющие типовые непроницаемые строительные покрытия (асфальт, бетон) или специальные теплоизолирующие покрытия для снижения интенсивности испарения.

Сосуды (резервуары) или аппараты со сжиженным газом согласно существующим нормативам имеют специальные защитные ограждения или дренажные системы, что, с точки зрения моделирования аварийных процессов, позволяет фиксировать в расчетах поверхность разлива. Трубопроводы для внутрибазовой перекачки сжиженных газов располагаются на эстакадах и защитных ограждений, как правило, не имеют. Поэтому в этом случае может происходить гравитационное растекание сжиженного газа по подстилающей поверхности (предполагается наличие строительного покрытия).

2. Разлив сжиженного газа на грунт с одновременным растеканием по поверхности и (принципиальной) возможностью частичной фильтрации жидкости в поры грунта. Характерным примером могут служить аварии на магистральных продуктопроводах, заложенных в маловлажных, высокопористых грунтах.

Вследствие того, что при сбросе давления сжатый газ значительно переохлаждается (характерные температуры для пропан-бутана и ШФЛУ - минус 20-35 °С [12]), его кипение на поверхности разлива носит явно выраженный нестационарный харак-

тер и происходит сначала при пленочном, а затем при пузырьковом режиме кипения, а подстилающий массив грунта охлаждается с фазовым переходом поровой воды.

ВНИИГАЗ'ом разработана, апробирована [7, 12] и рекомендуется для практического применения следующая модель расчета теплообмена сжиженного газа в общем случае с "многослойной" подстилающей поверхностью:

$$\begin{aligned} C_n \rho_n \frac{\partial T_n}{\partial \tau} &= \lambda_n \frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2}; & 0 \leq x \leq h \\ C_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} &= \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}; & h \leq x \leq \xi \\ C_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} &= \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}; & \xi \leq x \leq \infty \end{aligned} \quad (3.64)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \alpha(T_n(\tau, 0) - T_b) &= \lambda_n \left( \frac{\partial T_n}{\partial x} \right)_{x=0}, & \text{где } \alpha = a - \frac{b}{\Delta T(\tau)} \\ \lambda_n \left( \frac{\partial T_n}{\partial x} \right)_{x=h} &= \lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial x} \right)_{x=h}; & T_n(h, \tau) = T_1(h, \tau) \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} &= \chi \frac{\partial \xi}{\partial \tau} & \text{при } x = \xi \\ T_1(\tau, \xi) &= T_2(\tau, \xi) = T_v \end{aligned} \quad (3.65)$$

$$\left( \frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad T_2(\tau, \infty) = T_0.$$

Начальное условие:  $T_i(0, x) = T_0$ ,

где  $T_i(\tau, x)$  - распределения температур в строительном (теплоизоляционном) покрытии (индекс "и"), а также в зонах мерзлого (индекс "1") и талого (индекс "2") грунта;  $T_b$  - температура кипения жидкости;  $\lambda_n$ ;  $\lambda_1$ ;  $\lambda_2$ ;  $c_n$ ;  $c_1$ ;  $c_2$  - соответствующие коэффициенты теплопроводности и теплоемкости;  $\alpha(\tau)$  - коэффициент теплоотдачи на поверхности контакта "жидкость-грунт";  $\xi(\tau)$  - координата фронта фазового перехода влаги в грунте;  $\chi$  - количество тепла, отбираемое при замораживании единицы объема грунта с температурой  $T_v$  (температура фазового перехода влаги);  $T_0$  - начальная температура покрытия (грунта); а и b - коэффициенты зависимости коэффициента теплоотдачи сжиженного газа при пленочном режиме кипения от температурного напора.

Для решения этой общей задачи в [7] предложен специальный метод (интегрального теплового баланса), позволивший свести исходную систему дифференциальных уравнений в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка со стандартной процедурой решения на ЭВМ. Для ряда частных задач при этом удается получить простые аналитические решения [6, 8-10].

Аттестация модели проводилась сравнением расчетов с данными американско-

го эксперимента по кипению сжиженного метана на теплоизоляционном ячеистом бетоне (рис.27), а также с данными экспериментов (проведенных ВНИИГАЗ'ом совместно с ВНИИПО МВД РФ) по кипению сжиженного азота на песках различной влажности с непроницаемым покрытием (тонколистовая фольга) на поверхности.

При разливах охлажденных (криогенных) сжиженных газов на крупнодисперсных маловлажных грунтах интенсивность испарения сжиженных газов может значительно возрасти за счет частичной их фильтрации в поры грунта и, как следствие, резко возрастания "эффективной" поверхности теплообмена. Имеющиеся на сегодня эксперименты по кипению криогенных жидкостей [1-4] свидетельствуют о необходимости введения для крупнодисперсных маловлажных грунтов поправочного коэффициента на интенсивность теплопритока от массива грунта, равного 2,0-2,5. Аналитическая по цифрам экспериментальная информация по кипению охлажденных сжиженных углеводородных газов (пропан-бутан, ШФЛУ) получена ВНИИПО МВД РФ для сухих песчаных грунтов [13].

Выявлено также значительное влияние скорости ветра на интенсивность испарения сжиженных газов с поверхности (зеркала) жидкости. Эксперименты проведены с техническим пропаном в специальном теплоизолированном бассейне. Получены следующие значения интенсивности испарения за счет конвекции с атмосферой при различных скоростях ветра:

w, м/с	1,3	5,0	12,0
m, кг/м <sup>2</sup> · с	0,0064	0,019	0,038

## ЛИТЕРАТУРА

1. Humber-Basset, Rene and Alain Montet, "Dispersion dans l'atmosphère d'un nuage gazeux forme par expansion de GNL sur le sol", presented at LNG-3, Washington, D.C. (24-28 September 1972).
2. Drake E.M., Arthur D. Little, Inc., Cambridge, Mass., and Reid R.C., MIT, Cambridge Mass., "How LNG boils on soils", Hydrocarbon Processing May 1975.
3. Hogan W.G., Bowman B.R. and L.C. Haselman "Numerical modeling of LNG spill phenomena" Lawrence Livermore Laboratory, Seminar on LNG peak shaving, Washington, D.C. March 5-9, 1978.
4. R.C. Reid and R. Wang "The boiling rates of LNG on typical dike floor materials", Cryogenics, July 1978.
5. Кларк В. Криогенная теплопередача, В кн. "Успехи теплопередачи" М., Мир, 1971, с. 361-367.
6. Рубинштейн Л.И. Проблема Стефана, Рига, Звайгане, 1967, 457с.
7. Сафонов В.С. Обобщение интегрального метода для анализа и расчета процессов охлаждения и промерзания грунта вокруг многослойных конструкций плоской, цилиндрической и сферической симметрии, В сб. "Механика жидкости и газа", М., МИНХИПТ им. Губкина, вып. 186, с. 84-94.
8. Коздoba Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности, М., Наука, 1975, 387 с.
9. Карслоу Х.С. Егер Э.К. Теплопроводность твердых тел., Наука, 1964, 488 с.
10. Лыков А.В. Теория теплопроводности М., Высшая школа, 1967, 600 с.
11. Сафонов В.С., Едигаров А.С. Анализ особенностей и расчет интенсивности испарения сжиженного природного газа при его аварийных разливах по поверхности грунта, В сб. Вопросы транспорта газа, М., Недрa, 1967, вып. 64, 184 с.
12. "Разработать комплекс физико-математических моделей и программ и провести полигонные исследования процессов горения и взрыва, а также средств взрывопожарозащиты при возникновении аварий на объектах подготовки, транспорта и переработки газа и конденсата", Отчет ВНИИПО № 978 н/с М., 1991

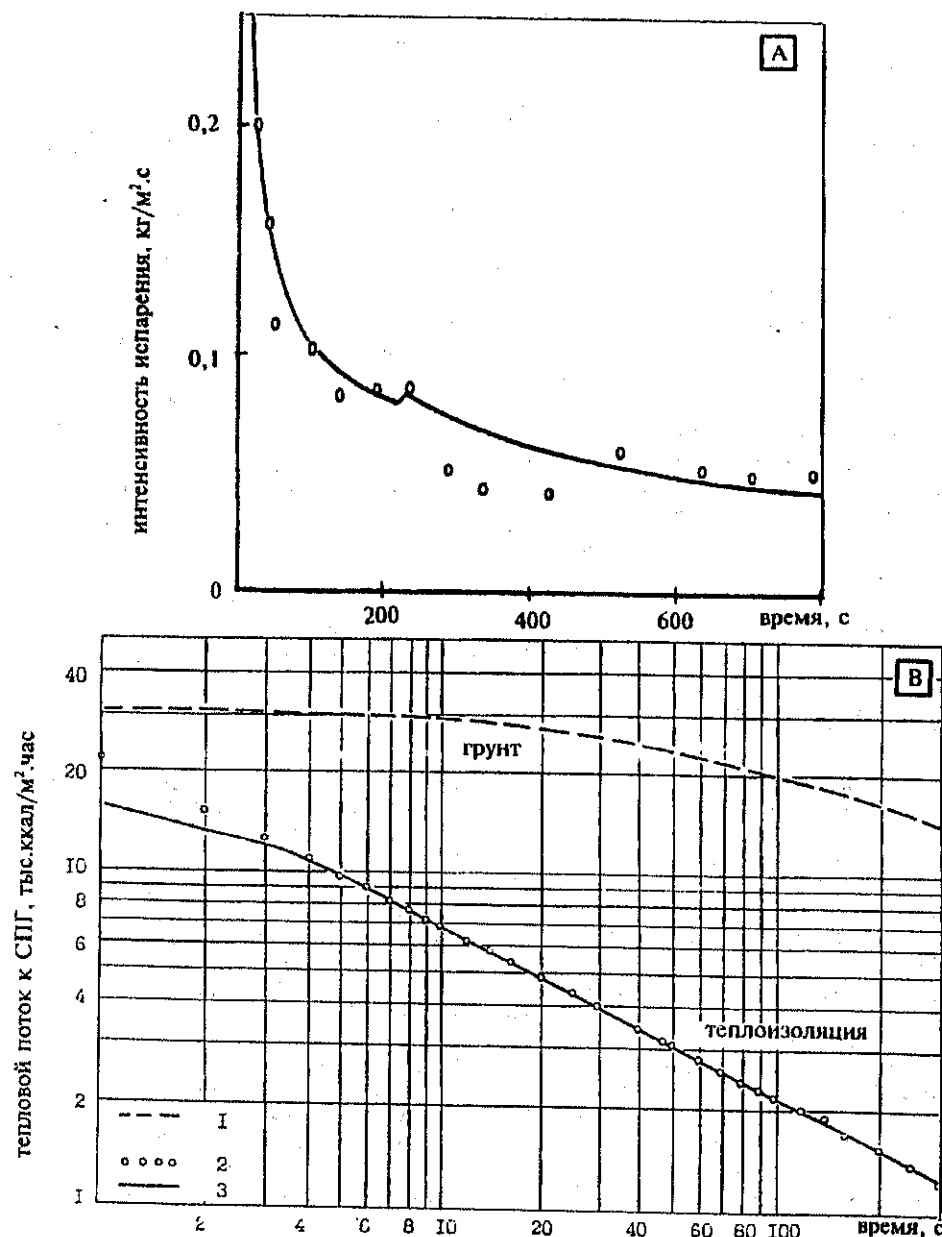


Рис. 27. Сравнение расчетных (1,3) и экспериментальных (2) данных по кипению сжиженного азота (А) и СПГ (В) на песчанном грунте (влажность 9,4%) с непроницаемым покрытием и теплоизоляционным бетоном.

в) парообразование вследствие турбулентного теплообмена с атмосферой

Составляющая теплового потока из атмосферы в общей постановке определяется решением задачи распространения облака неизоотермичного тяжелого газа приземном слое атмосферы по найденному температурному полю в области источника

$$q_a = \rho K_z \left. \frac{\partial H_a}{\partial z} \right|_{z=0},$$

где  $H_a$  - энтальпия паровоздушной смеси.

Таким образом, суммарная удельная интенсивность парообразования может быть представлена следующим уравнением

$$M_i(\tau) = mG\delta(\tau - \tau_p) + \frac{q_r + q_a}{\sigma_i} \delta(\tau - \tau_i) \quad (3.66)$$

где  $q_r$  - теплоприток от массива грунта,  $\sigma_i$  - теплота фазового перехода.

Соответствующее выражение для функции источника в виде вертикальной скорости поступления паров в атмосферу

$$W^* = W_p \delta(\tau - \tau_p) + [W_s + W_a] \delta(\tau - \tau_i)$$

где  $W_p, W_s, W_a$  соответственно скорости поступления паров в атмосферу за счет падения давления на срезе трубы, теплопритока из грунта и атмосферы;  $\delta$  - дельта-функция;  $\tau_p, \tau_i$  - время истечения и испарения соответственно.

Как было отмечено выше, при авариях на системах, не имеющих защитных ограждений, будет происходить растекание сжиженного газа по поверхности. Сценарии растекания при этом могут быть весьма разнообразны и зависеть от (сезонного) состояния поверхности, рельефа местности и целого ряда других факторов. На уровне инженерного анализа рекомендуются следующие варианты оценок:

1. Скорость гравитационного растекания "цилиндрического" слоя определяется из простого уравнения материального баланса:

$$\frac{\sum G_n(\tau) - \Delta m(\tau)}{\rho_l S(\tau)} = \frac{\partial R}{\partial \tau} = \sqrt{2g[h(\tau) - h_{\min}(\tau)]} \quad (3.67)$$

где  $\sum G_n(\tau), \Delta m(\tau)$  - суммарная интенсивность аварийного истечения и испарения сжиженного газа соответственно,  $S$  - текущая поверхность разлива;  $h$  и  $h_{\min}$  - текущая и минимальная (по условиям "сплошности") толщина пленки.

Компанией "Газ де Франс" по результатам экспериментов на жидком метане и азоте рекомендуются следующие значения  $h_{\min}$ :

природа поверхности	$h_{min}$ (см)
бетонная поверхность	0,3
водная поверхность	1
сухая песчаная почва	20
влажная песчаная почва	15
гравий	5

2. Предполагается, что разрушение трубопровода и истечение продукта происходит в пределах природной котловины с геометрическим приближением, например, в виде сферического сегмента. Тогда текущий объем разлива:

$$V = \frac{\pi}{6} h_i (3R_j^2 + h_i^2), \quad (3.68)$$

а текущая величина "смоченной" поверхности грунта:

$$S = 2\pi R_k h_i, \quad (3.69)$$

где  $h_i$  - глубина заполнения котловины;  $R_j$  - радиус "зеркала" жидкости;  $R_k$  - радиус сферического сегмента.

Таким образом текущий материальный баланс (интенсивность истечения и испарения сжиженного газа) увязана с текущими геометрическими характеристиками процесса теплообмена.

В качестве характерных примеров на рис.28-30 представлены расчеты удельной интенсивности испарения ШФЛУ на различных влажных грунтах (принятые коэффициенты увеличения интенсивности испарения: песок - 2, суглинок - 1,5; высоковлажный торф - 1,0), а также динамика растекания и испарения ШФЛУ по поверхности в пределах грунтовой котловины при различных интенсивностях аварийного истечения, характерных для трубопроводов  $D$  400-500 мм.

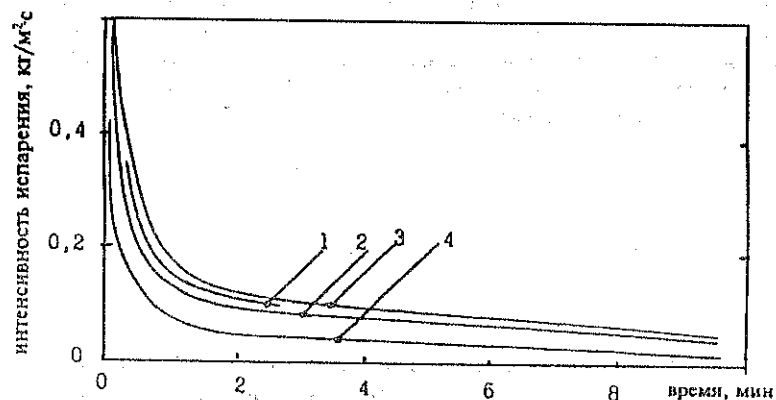


Рис. 28. Испарение ШФЛУ при кипении на поверхности влажных грунтов летом (1 - суглинок,  $\Delta W = 20\%$ ; 2 - торф,  $\Delta W = 80\%$ ; 3 - песок,  $\Delta W = 15\%$ ), зимой - 4.

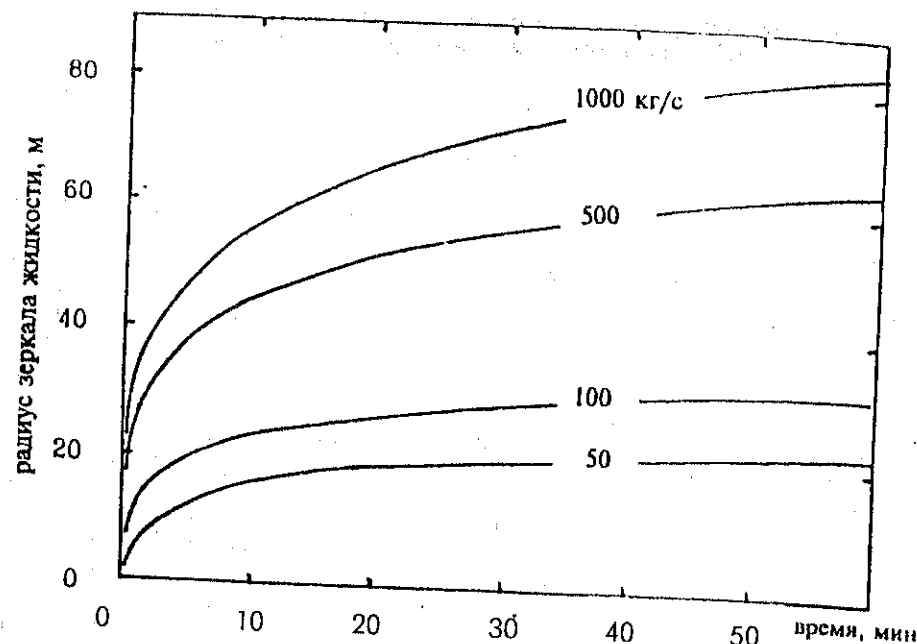


Рис. 29. Растекание ШФЛУ по поверхности грунта в котловине ( $R_k = 750$  м) при различных интенсивностях истечения из трубопровода.

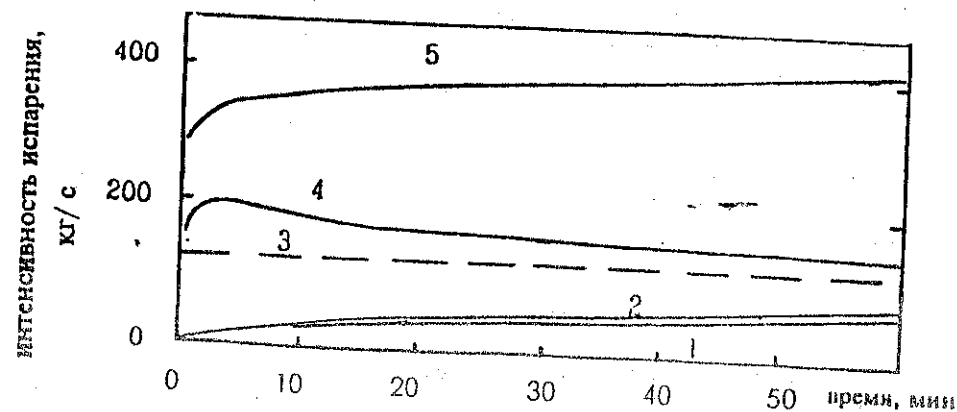


Рис. 30. Испарение и растекание ШФЛУ в котловине ( $R_k = 750$  м) при истечении из трубопровода с расходом 500 кг/с (1,2 - радиационное и конвективное воздействие на зеркало жидкости; 3 - изоэнгальпийное расширение; 4 - теплоприток от грунта; 5 - интегральная интенсивность испарения).

### 3. Динамика движения и рассеивание облаков тяжелого неізотермического газа в приземном слое атмосферы. \*)

Имеющиеся на сегодня многочисленные экспериментальные и теоретические исследования свидетельствуют о формировании сложного трехмерного турбулентного течения в области выброса неізотермического тяжелого газа, характерные масштабы которого зависят не только от термодинамических параметров и массы истекающего сжиженного газа, но и от характера теплообмена с окружающей средой, степени естественной турбулизации атмосферы в момент выброса, скорости ветра, шероховатости подстилающей поверхности, рельефа местности и т.д. Возникающие в области источника паров СУГ градиенты плотности, температуры и давления формируют "локальное" поле сил плавучести, следствием которого является возникновение гравитационного течения, способствующего распространению облака не только в направлении ветра, но и в поперечном и даже в противоположном скорости ветра направлениях. Характерные скорости и масштабы указанного гравитационного течения определяются многофакторным взаимодействием выделяющихся паров с атмосферным потоком воздуха. Интенсивность турбулентного обмена и рассеивания при этом существенно изменяется не только во времени но и в пространстве. Анализ проблемы [1-5] показал, что представленные на сегодня в технической литературе многочисленные эмпирические и полуэмпирические модели [3] движения и рассеивания облака тяжелых (углеводородных) паров не отвечают современным представлениям о весьма сложных теплообменных процессах турбулентного переноса и однозначно не могут быть рекомендованы для практического анализа физических эффектов и масштабов негативного воздействия в задачах анализа риска.

Корректное описание возникающего при выбросе в атмосферу сжиженного газа турбулентного течения требует рассмотрения полной системы трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса для вязкого сжимаемого теплопроводного газа в поле силы тяжести:

закона сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{U}) = 0$$

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{U} C) = \operatorname{div}(\rho K \cdot \operatorname{grad}(C))$$

закона сохранения импульса

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{U} u) = \operatorname{div}(\rho K \cdot \operatorname{grad}(u)) - \frac{\partial P}{\partial X}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{U} v) = \operatorname{div}(\rho K \cdot \operatorname{grad}(v)) - \frac{\partial P}{\partial Y}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{U} w) = \operatorname{div}(\rho K \cdot \operatorname{grad}(w)) - \frac{\partial P}{\partial Z} - \rho g$$

закона сохранения энергии

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{U} H) = \operatorname{div}(\rho K \cdot \operatorname{grad}(H)) + \frac{\partial P}{\partial t}$$

(3.70)

\*) раздел подготовлен А.С. Едигаровым

Здесь  $t$  - время,  $\rho$  - плотность газа(паро)воздушной смеси,  $C$  - массовая концентрация,  $u, v, w$  - проекции вектора скорости  $\vec{U}$  на оси  $X, Y, Z$  соответственно,  $H$  - энтальпия,  $P$  - давление,  $K$  - турбулентная вязкость,  $g$  - ускорение свободного падения.

Для замыкания исходной системы уравнений использовалось уравнение состояния идеального газа:

$$P = \rho T [C_p R_g + (1-C) R_v]$$

и уравнение для энтальпии смеси газ - влажный воздух, учитывающее дополнительный нагрев облака холодного газа вследствие фазовых переходов атмосферной влаги:

$$H = [C_{p_a} (1-C) + C_{p_v} C] T + r_w \zeta (1-C) \Psi(T) \quad (3.71)$$

где  $C_{p_a}, C_{p_v}$  - теплоемкость воздуха и паров сжиженного газа соответственно,  $\zeta$  - абсолютная влажность воздуха,  $r_w$  - теплота фазового превращения атмосферной влаги,  $R_a, R_v$  - газовая постоянная воздуха и паров соответственно,  $\Psi(T)$  - линейная температурная функция [7]:

$$\Psi(T) = \begin{cases} 0, & T \leq 263K \\ (T - 263) / 20, & 263 < T \leq 283K \\ 1, & T > 283K \end{cases}$$

Граничные и начальные условия рассматриваемой задачи можно охарактеризовать следующим образом.

На свободных границах исследуемой области, где по условию задачи задан невозмущенный поток, распределение физических величин определяется текущим состоянием атмосферы.

На поверхности ( $z=0$ ), скорость облака  $U(x, y, 0, t) = 0$ , поток примеси  $\rho K_z (\partial C / \partial z) = 0$ . При этом конвективный теплообмен облака с земной поверхностью рассчитывался по уравнению  $q_s = \alpha (T_s - T)$  ( $T_s$  - температура поверхности грунта) с постоянным коэффициентом теплопередачи  $\alpha$ .

В области источника выброса термодинамические параметры соответствуют плотности и энтальпии насыщенных паров сжиженного газа при атмосферном давлении, массовая концентрация  $C=1$ , вертикальная компонента вектора скорости  $W(t)$  определяется интенсивностью поступления паров в атмосферу вследствие теплообмена сжиженного газа с окружающей средой.

Начальные условия отражают состояние атмосферы в момент выброса.

Одной из ключевых проблем численной реализации исходной модели является определение коэффициентов турбулентной диффузии. Этому вопросу посвящено большое число экспериментальных и теоретических исследований [2-5]. На базе результатов этих исследований была разработана следующая схема расчета коэффициентов турбулентного обмена. Начальное распределение коэффициентов турбулентного обмена в невозмущенной среде находилось по известным метеорологическим формулам в соответствии с заданным профилем скорости ветра [6]:

$$K_z^a = \frac{ku_z^2 z}{\varphi_a}, \varphi_a = \begin{cases} \left(1 - 16 \cdot \frac{z}{L}\right)^{-0.25}, & L \leq 0 \\ \left(1 + 5 \cdot \frac{z}{L}\right), & L > 0 \end{cases} \quad (3.72)$$

где  $k$  - постоянная Кармана;  $L$  - характерный масштаб длины Монина-Обухова;  $u_z^a$  - динамическая скорость, (индекс "а" - указывает на параметры атмосферы в невозмущенном состоянии).

При описании воздействия источника тяжелого газа на прилегающие слои атмосферного воздуха для каждой дискретной точки расчетной области вычислялось массовое число Ричардсона ( $Ri^*$ ). При  $Ri^* > 0$  и  $p > (p_0 + 0,005)$  вертикальное распределение турбулентной вязкости рассчитывалось по уравнению, учитывающему присутствие в атмосфере более тяжелого газа [2,5]:

$$K_z = \frac{V_z z}{1 + \gamma} = \frac{ku_z z}{(0,88 + 0,099 Ri^{1,04})(1 + \gamma)}, \quad (3.73)$$

$$Ri^* = \frac{\Delta \rho g h_{eff}}{\rho_a u_*^2}, h_{eff} = \frac{1}{C_0} \int_0^\infty C dz$$

где  $V_0$  - скорость вовлечения ("захвата") воздуха в облако,  $h_{eff}$  - эффективная высота газового облака,  $C_0$  - максимальная концентрация газа на оси симметрии облака,  $\gamma$  - показатель в степенном законе изменения скорости ветра с высотой,  $u^*$  - скорость трения в облаке паров сжиженного газа (в численных расчетах принималась равной  $u_*^a$ ). В противном случае, т.е. при  $p \leq (p_0 + 0,005)$ , использовалась зависимость [2].

В соответствии с [7] коэффициенты турбулентной диффузии в горизонтальном направлении  $K_x$  и  $K_y$  отличаются от коэффициентов диффузии в вертикальном направлении  $K_z$  на постоянный коэффициент  $\beta$

$$K_x = K_y = \beta K_z$$

Коэффициент  $\beta$  принимает значения от 0,1 до 65 в зависимости от класса устойчивости атмосферы по классификации Гиффорда-Паскуилла.

Численный анализ и сопоставление с экспериментальными данными показали, что для получения достоверных значений коэффициентов турбулентности в приземной области с помощью уравнений (2) и (3) последние должны быть откорректированы. Соответствующая корректировка была проведена путем замены  $z$  на  $z + z \exp(-z/z_0)$  (аналогично процедуре [8]), с выполнением граничного условия для касательного напряжения на поверхности ( $z=0$ ):

$$\rho_a K_z^a \frac{\partial U^a}{\partial z} = \rho_a u_*^2$$

Для реализации поставленной задачи была использована неявная консервативная конечно-разностная схема расчета, основанная на использовании модифицированного алгоритма расщепления по физическим процессам и пространственным

направлениям повышенной точности [9] в сочетании с методом контрольного объема [10]. Особенности построения схемы подробно изложены в [1].

Верификация предложенной математической модели, численного алгоритма модели турбулентного переноса осуществлялась сравнением расчетных данных с результатами натурных экспериментов по рассеиванию в атмосфере паров сжиженного природного газа и сжиженного пропана в рамках экспериментальной программы "Marlin Sands-1980" [11], а также экспериментов с изотермическим тяжелым газом (смесью фреона и азота) на полигоне острова "Thorney" 1982-1984г. [12]. В качестве иллюстрации достоверности модели на рис.31,32 представлены некоторые результаты сравнения расчетов с показаниями локальных датчиков концентрации для экспериментов по мгновенному выбросу до 100 тонн тяжелого газа на острове "Thorney", а также теоретические и экспериментальные распределения максимальных концентраций в облаке сжиженного природного газа и пропана для серии экспериментов "Marlin". Проведенный анализ по различным параметрам течения (скорости перемещения центра облака, максимальной фронтальной скорости, временной зависимости концентрации в локальных точках, максимальному расстоянию распространения облака с заданной концентрацией и др.) свидетельствует о хорошем согласовании модельного прогноза с экспериментом.

В качестве характерного примера на рис.33 представлены результаты численных расчетов динамики формирования облака СУГ при кипении на глинистом грунте (р-н г.Оренбурга) в пределах поверхности защитного ограждения.

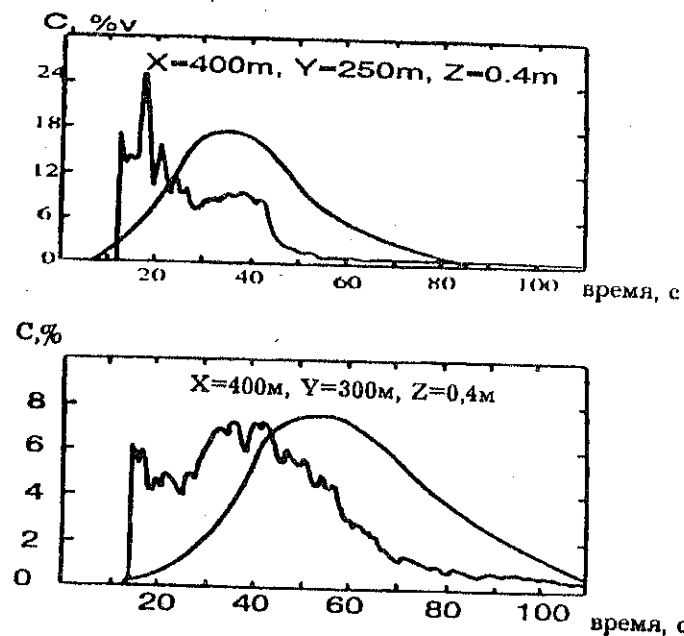
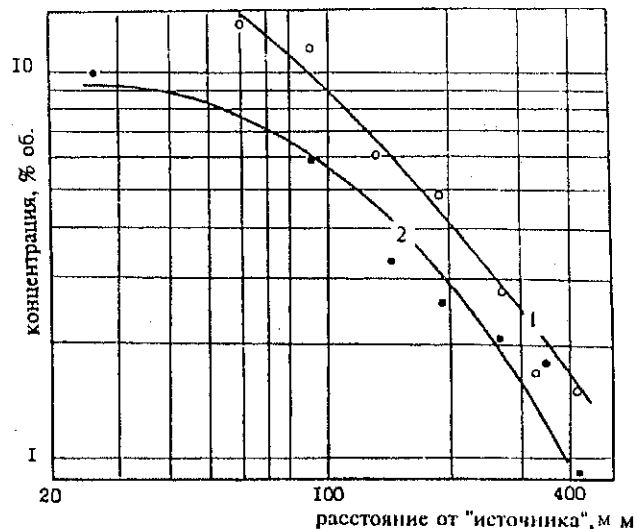
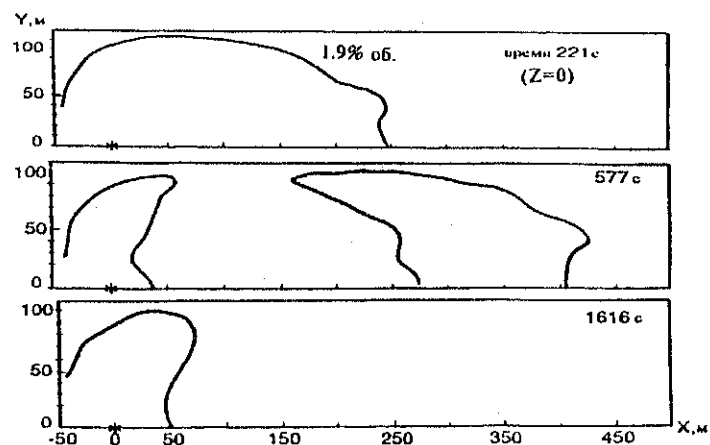


Рис. 31. Сравнение численных расчетов с показаниями локальных датчиков концентрации для эксперимента №15 по рассеиванию "тяжелого" газа серии "Thorney".



**Рис. 32.** Сравнение теоретических и экспериментальных данных по распределению максимальных концентраций в направлении ветра для серии натурных экспериментов "Maplin" (1 - опыт №29 с СПГ, 2 - опыт №46) с жидким пропаном.



**Рис. 33.** Эволюция взрывоопасного облака в атмосфере (класс "F", скорость ветра 2 м/с) при мгновенном выливании и растекании СУГ из резервуара под давлением в пределах защитного ограждения размерами 25х60 м на глинистый грунт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Едигаров А.С. Численный расчет турбулентного течения холодного тяжелого газа в атмосфере // Журнал вычисл. математики и мат. физики, 1991, т.31, №9, с.1369-1380.
2. Spicer T., Havens J. Field test validation of the DEGADIS model // Journal of Hazardous Materials, 1987, vol.16, p.231-245.
3. Colenbrander G. A mathematical model for the transient behavior of dense vapour clouds // 3rd International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Switzerland, 1980, p.1104-1132.
4. Добрычев О.В. Рассеяние тяжелых газов в атмосфере, РИЦ "Курчатовский институт", 1993.
5. Едигаров А.С. Численный анализ различных моделей турбулентного переноса в атмосфере // ИФЖ, 1991, т.61, №3, с.501-503. Деп. в ВИНТИ 24.04. №1726-В91.
6. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. Л.: ГИМЕТ, 1985.
7. England W.G., Teuscher L.H., Hemser L.E., Freeman B.E. Atmospheric dispersion of liquefied natural gas vapor clouds using "SIGMET" computer code // Heat Transfer and Fluid Dynamics Institute, Washington State University, 1978.
8. Ermak D.L., Chan S.T., Morgan D.L., Morris I.K. A comparison of dense gas dispersion model simulations with BURRO series LNG spill test results // J. Hazardous Materials, 1982, p.129-160.
9. Ковеня Н., Яненко Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск, 1985.
10. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкостей, 1984.
11. Colenbrander G., Puttock J. Maplin Sands experiments 1980: interpretation and modeling of liquefied gas spills onto the sea // IUTAM Symposium "Atmospheric Dispersion of Gases and Small Particles", Netherlands, 1983, p.277-295.
12. Carr K. Estimates of the mean concentration and variance for the Thorney Island phase dense gas dispersion experiments // Journal of hazardous materials, 1987, vol.16, p.75-101.

#### 4. Характеристики воздушных ударных волн, образующихся при сгорании углеводородных облаков. \*)

При авариях в системах производства, транспортировки и хранения сжиженных углеводородных газов образуется облако "тяжелых" паров, которое при достижении им источников зажигания может сгорать с высокой скоростью с формированием в окружающем пространстве (вне зоны горения) воздушной волны избыточного давления.

Сгорание топливно-воздушной смеси может протекать как в режиме детонации, так и в режиме быстрого горения (дефлаграции) [1], принципиально отличных по механизму инициирования и распространения фронта горения (эффект самовоспламенения за счет интенсивного сжатия смеси сверхзвуковой ударной волной при детонации и классический механизм радиационно-конвективного нагрева до температуры воспламенения слоев смеси перед фронтом горения в режиме дефлаграции). Существенно различаются также и основные характеристики взрывного сгорания: величина избыточного давления и импульсы фаз сжатия и разрежения. В "ближней" к эпицентру зоне детонационное избыточное давление значительно (см. рис.34) превышает давление, развиваемое при дефлаграции даже в случае околозвуковых скоростей горения; в то же время в "дальней" зоне различие между режимами горения по избыточному давлению может быть в ряде случаев незначительным. Существенно различаются импульсные характеристики взрыва: при детонации - высокая амплитуда, пикообразный характер и короткий период действия, причем период положительной и отрицательной фаз примерно одинаковы (1 - 5 мс); при дефлаграции - значительно меньшая амплитуда, относительно монотонный (синусообразный) характер нарастания (убывания) давления и значительно больший, чем при детонации, период действия, причем период отрицательной фазы (до 100 мс и более) в 2 - 5 раз превышает период положительной фазы. Как свидетельствует практика, именно этот эффект оказывает весьма значительное влияние на потенциальные масштабы разрушений конструкций в "дальней" зоне (в частности, стекла в домах вылетают наружу).

Следует особо подчеркнуть, что согласно многочисленным экспериментам, а также материалам расследований промышленных аварий [2-5], при распространении углеводородных облаков в "открытых" (не полностью замкнутых) пространствах даже при их сильных "загромождениях" (промзастройка, кустарник и т.п.), режим горения протекает со скоростью, не превышающей околозвуковую скорость ( $\approx 250$  -  $300$  м/с), без эффектов разгона фронта горения с последующим переходом к детонации.

В связи с тем, что в настоящее время не создана модель, позволяющая однозначно предсказать скорость взрывного превращения, для инженерной оценки нами рекомендуется использовать специальную *экспертную таблицу* института Химической Физики РАН, в которой топлива, способные к образованию горючих смесей с воздухом, разделены на определенные классы по чувствительности к инициированию взрывных процессов. Геометрические характеристики окружающего пространства также разделены на несколько классов в соответствии со степенью их потенциальной опасности (степенью загроможденности). В зависимости от типа вещества и степени загроможденности пространства экспертная таблица позволяет определить наиболее вероятный режим взрывного превращения смеси.

\*) раздел подготовлен совместно с Б.Е. Гельфандом

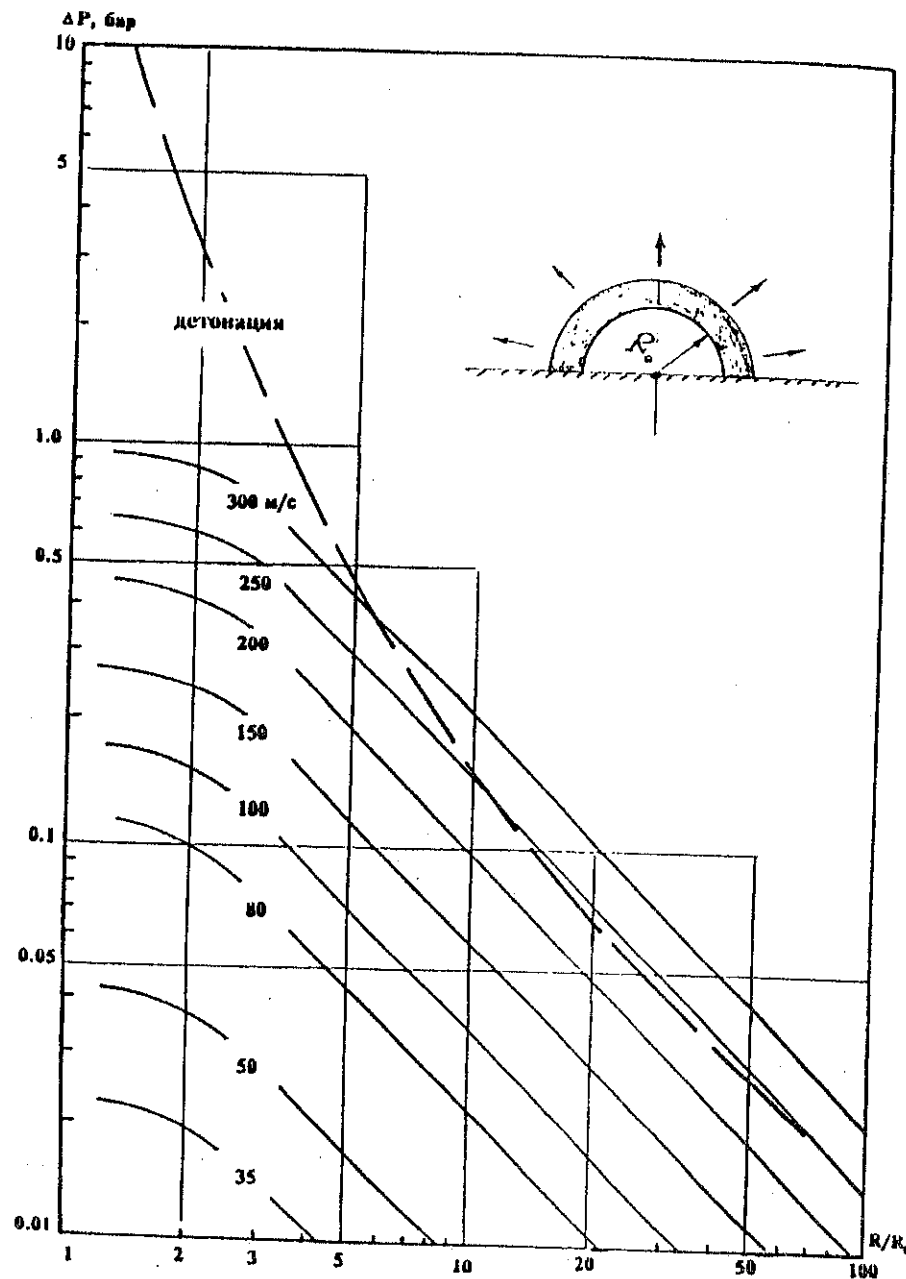


Рис. 34. Характерные значения избыточного давления при дефлаграционном горении углеводородных газов ("сферическая" модель).



### Классификация топлив

- класс 1:** Особо чувствительные вещества. (Размер детонационной ячейки менее 2 см).
- класс 2:** Чувствительные вещества. (Размер детонационной ячейки лежит в пределах от 2 до 10 см).
- класс 3:** Средне чувствительные вещества. (Размер детонационной ячейки лежит в пределах от 10 до 40 см).
- класс 4:** Слабо чувствительные вещества. (Размер детонационной ячейки больше 40 см).

класс 1	класс 2	класс 3	класс 4
ацетилен винилацетилен водород гидразин изопропилнитрат метилацетилен нитрометан окись пропилена окись этилена этилнитрат	акрилонитрил акролеин аммиак бутан бутилен бутадиен 1,3 - пентадиен пропан пропилен сероуглерод этан этилен эфиры: -диметилловый -дивиниловый -метилбутиловый ШФЛУ	ацетальдегид ацетон бензин винилацетат винилхлорид гексан генераторный газ изооктан метиламин метилацетат метилбутилкетон метилпропилкетон метилэтилкетон октан пиридин сероводород спирты: -метиловый -этиловый -пропиловый -амиловый -изобутиловый -изопропиловый циклогексан этилформиат	бензол декан дизтопливо о-дихлорбензол додекан керосин метан метилбензол метилмеркаптан метилхлорид нафталин окись углерода фенол хлорбензол этилбензол

### Классификация окружающего пространства

- класс 1:** Наличие смежных объемов: длинных труб, полостей, заполненных горючей смесью, при горении в которых возможно ожидать формирование турбулентных струй продуктов сгорания и турбулилизацию

смеси в смежных объемах. Характерные размеры труб, проходных выходных сечений достаточно велики: не менее 10-13 размеров детонационной ячейки данной смеси.

- класс 2:** Сильно загроможденное пространство: наличие полузамкнутых объемов, высокая плотность размещения технологического оборудования, лес, большое количество повторяющихся препятствий.
- класс 3:** Средне загроможденное пространство: отдельно стоящие технологические установки, резервуарный парк.
- класс 4:** Слабо загроможденное и свободное пространство.

### Классификация взрывных режимов превращения топливно-воздушной смеси по диапазонам скоростей их распространения

- класс 1:** Детонация или горение со скоростью фронта пламени более 500 м/с
- класс 2:** Дефлаграция, скорость фронта пламени 300-400 м/с
- класс 3:** Дефлаграция, скорость фронта пламени 200-300 м/с
- класс 4:** Дефлаграция, скорость фронта пламени 150-200 м/с
- класс 5:** Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением  $u_f = k_1 \cdot M^{1/6}$ , где  $k_1$  - константа, лежащая в диапазоне от 35 до 43,  $M$  - масса топлива, содержащегося в облаке горючей смеси в тн.
- класс 6:** Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением  $u_f = k_2 \cdot M^{1/6}$ , где  $k_2$  - константа, лежащая в диапазоне от 17 до 26.

### Экспертная таблица (класс режима горения)

класс топлив- ной смеси	класс окружающего пространства			
	1	2	3	4
1	1	1	2	3
2	1	2	3	4
3	2	3	4	5
4	3	4	5	6

Для характерных случаев аварийного образования и воспламенения углеводородных облаков (пропан, бутан, ШФЛУ) в пределах технологических площадок из представленных данных следует следующие характеристики:

- класс топлива - 2  
класс пространства - 3 (2)  
класс взрывных превращений - 2 (3)

При этих условиях наиболее вероятная скорость сгорания облака лежит в диапазоне 250 - 300 м/с.

Для открытых пространств (аварии на магистральных конденсатопроводах) скорость горения снижается до 150 - 200 м/с.

Особо подчеркнем, что речь идет о режимах горения в так называемом "сферическом" приближении.

В случае режима дефлаграции параметры воздушной ударной волны зависят не только от энергетических характеристик смеси, но и от скорости распространения фронта пламени и степени расширения продуктов сгорания. В литературе имеется достаточно большое количество работ как теоретических, так и экспериментальных, посвященных определению параметров ударных волн при дефлаграционном сгорании газообразных топливо-воздушных смесей. Обобщение этих данных, проведенное в институте Химической Физики РАН, нашло свое отражение в следующих зависимостях для величины избыточного давления и импульса фазы сжатия для сферической модели горения:

$$P_x = \left( \frac{u_F}{a_0} \right)^2 \left( \frac{v-1}{v} \right) \left( \frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2} \right) \quad (3.74)$$

$$I_x = \frac{u_F}{a_0} \left( \frac{v-1}{v} \right) \left[ 1 - 0,4 \left( \frac{v-1}{v} \right) \frac{u_F}{a_0} \right] \left( \frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3} \right)$$

где  $u_F$  - скорость фронта пламени,  $v$  - степень расширения продуктов сгорания (для углеводородов при нестехиометрическом смешении с воздухом -  $v=3,5-4,0$ );  $a_0$  - скорость звука в воздухе;

$$P_x = \frac{\Delta P}{P_0}; I_x = \frac{I^* a_0}{(E_B P_0^2)^{1/3}}; R_x = \frac{R}{(E_B / P_0)^{1/3}};$$

$E_B$  - энергия взрывного превращения: количество реагирующего вещества, умноженное на теплоту сгорания;  $P_0$  - атмосферное давление;  $R$  - расстояние от эпицентра взрыва;  $I^*$  - импульс положительной фазы;  $\Delta P$  - избыточное давление.

Представленные выше данные основаны в большей своей части на обобщении экспериментальных исследований по горению или взрыву определенных объемов газозооных смесей, как правило, стехиометрического или близкого к нему состава, однородного по объему, с исходной геометрией, близкой к сферической (наддувные шары) и, в основном, с центральным поджиганием.

Использование этой информации для прогноза эффектов поражения и разрушения при воспламенении плоских, вытянутых по направлению ветра углеводородных облаков (характерные линейные размеры для аварий в пределах промзон (резервуары высокого давления, трубопроводы) - 400 - 600 м; для случаев аварий на магистральных трубопроводах - 1,0 - 1,5 км; наиболее характерные отношения максимальных значений длины и ширины 3,5 - 5,0; толщина (высота) облака - 1,5 - 3,0 м) требует дополнительных уточнений.

Анализ натурных экспериментов по специфике распространения по ровной местности и горения облаков СПГ (LNG) и сжиженного пропана (LPG) с характерными линейными размерами 400 - 700 м (серия Coyote - [5]) показал, что при поджи-

гании облака "по передней кромке" (по фронту) происходит горение облака в виде, относительно узкой "стены огня". При этом основная часть потенциальной энергии взрывного превращения реализуется в виде свободно расширяющейся вверх "тепловой конвективной колонки". Максимальные уровни избыточного давления, зарегистрированные в непосредственной близости от горящего облака, не превышают при этом 0,1 - 0,15 бар. Несколько большие значения избыточного давления (0,2 - 0,3 бар и более) были зарегистрированы при "позднем" поджигании облака примерно его центре. При этом источник поджигания располагался на поверхности грунта.

Исходя из анализа современных теоретических и экспериментальных исследований для практического использования в рамках методологии промышленного риска рекомендуются следующие положения:

1. В качестве базовой для расчета верхних уровней избыточного давления при воспламенении углеводородных облаков принимается "сферическая модель" дефлаграционного горения.

2. При наличии реальных возможностей расчета трехмерной конфигурации облака эпицентр взрывных превращений помещается в центр масс объема облака, концентрацией горючего между нижним и верхним пределом воспламенения. При отсутствии таких возможностей эпицентр взрыва совмещается с источником зажигания для случая источника образования паров "мгновенного типа" и располагается условно в середине облака (на половине длины) для случая кипения СУГ на грунте или строительных покрытиях (источник с экспоненциально убывающей интенсивностью).

3. Для расчета заведомо верхних уровней избыточного давления и импульса положительной фазы используются представленные выше уравнения дефлаграционного горения, скорость которого определяется по соответствующей экспертной таблице. Для экспресс-анализа могут быть рекомендованы также данные, представленные на рис. 34 при предварительном определении характеристического размера -  $R_0$ . По физическому смыслу величина  $R_0$  полностью эквивалентна параметру  $(2E_B/P_0)^{1/3}$ . В практическом приложении, при наличии возможностей рассчитать объем горючей смеси между верхним и нижним концентрационным пределами воспламенения ( $V_{01}$ ),

эквивалентный характеристический радиус полусферы определяется как  $\left( \frac{3V_{01}}{2\pi} \right)^{1/3}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Маршалл В. Основные опасности химических производств. М., 1989, 672 с.
2. Brossard J et al. AIAA, 1983, v.94, p.556-567.
3. A. Lannoy Analyse des explosions air - hydrocarbure en milieu libre - Electricite de France Direction des Etudes et Recherches, Ser.A №3 1984
4. J Lee Fuel - Air Explosions - Univers. of Waterloo Press, 1982, p.1006
5. H. Rodean, W. Hagan. "Vapor Burn Analysis for the Coyote Series LNG Spill Experiments" Lawr. Livermor Nation. UCRL-53530 April 1984

## 5. Радиационное тепловое воздействие на окружающую среду при горении углеводородных жидкостей с поверхности разлива \*)

Рекомендуемая методика и алгоритм расчета характеристик горения сжиженных газов и нефтепродуктов включают следующие основные предположения и эмпирические соотношения:

1. Горение рассматривается как диффузионное (т.е. непосредственно зависящее от режима эжекции воздуха в зону горения) и происходит с открытой поверхности (в самом резервуаре при срыве перекрытия или при разливе в пределах защитного ограждения);

2. Высота (длина -  $L$ ) видимой (излучающей определенную долю тепла) части пламени определяется гидродинамическими факторами и наиболее достоверно может быть рассчитана по эмпирической формуле Томаса [1]:

$$\frac{L}{D_{\text{эк}}} = a \left( \frac{m}{\rho_a \sqrt{g D_{\text{эк}}}} \right)^b \quad (3.75 \text{ а})$$

или с учетом влияния ветра на скорость сгорания, а следовательно и длину пламени:

$$\frac{L}{D_{\text{эк}}} = a_1 \left( \frac{m}{\rho_a \sqrt{g D_{\text{эк}}}} \right)^{b_1} \cdot (u_*)^{c_1}; \quad u_* = \frac{W_0}{\sqrt{\frac{m g D_{\text{эк}}}{\rho_{\text{п}}}}} \quad (3.75 \text{ б})$$

где  $m$  - массовая скорость выгорания с поверхности ( $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ );  $\rho_a$  - плотность воздуха;  $D_{\text{эк}}$  - эквивалентный диаметр очага горения;  $W_0$  - скорость ветра,  $\rho_{\text{п}}$  - плотность паров топлива при температуре кипения поверхности раздела фаз (для кипящих сжиженных газов - температура кипения при атмосферном давлении).

Эмпирические коэффициенты в формуле Томаса ( $a=42$ ,  $b=0.61$ ,  $a_1=55$ ;  $b_1=0.67$ ;  $c_1=-0.21$ ) получены по результатам экспериментов, выполненных для широкого диапазона изменения параметров ( $10^{-3} \leq L/D_{\text{эк}} \leq 10$ ;  $10^{-6} \leq m/(\rho_a \sqrt{g D_{\text{эк}}}) \leq 10^{-2}$ ) применительно к самым различным горючим жидкостям и сжиженным газам - рис 35;

3. Пламя рассматривается как оптически "серый" монохроматический поверхностный излучатель;

4. При расчете внешнего излучения сложная, изменяющаяся во времени геометрическая форма пламени эквивалентуется цилиндрической поверхностью с сохранением реальных значений высоты и (эквивалентного) диаметра основания пламени;

5. Элементарное тепловое (радиационное) воздействие на объект от пламени определяется как

$$dq = E \cdot v \cdot d\varphi$$

где  $E$  - излучение с единицы поверхности (оболочки) видимой части пламени;  $v < 1$  - коэффициент поглощения излучения атмосферой (в основном парами воды) или защитной водяной завесой;  $\varphi$  - угловой коэффициент облучения, определяемый геометрическими факторами

\*) раздел подготовлен совместно с В.С. Овчаровым, Т.В. Митрофановой

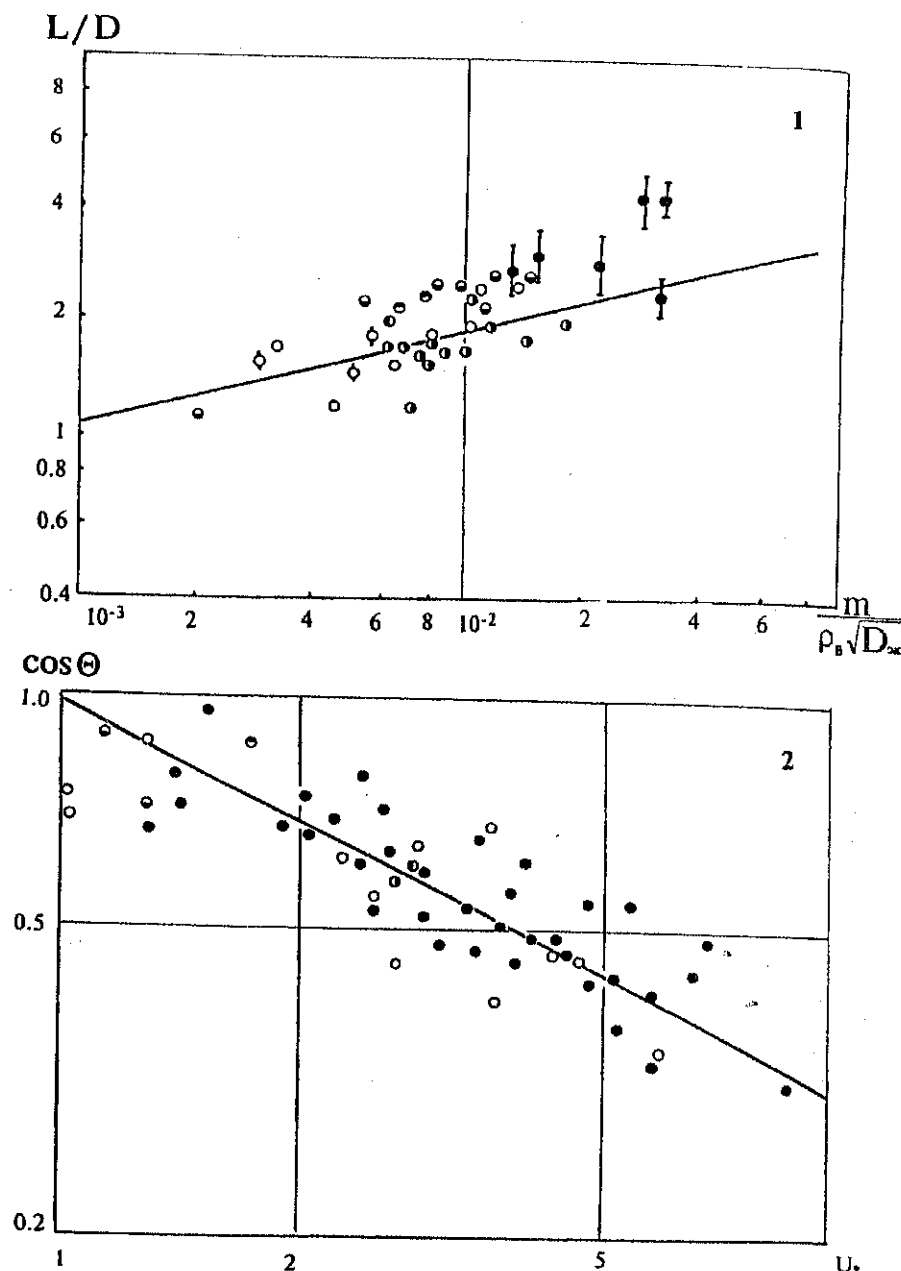


Рис. 35. Сравнение расчетных (1-Томас, 2 - Атталах, Радж) и экспериментальных данных по геометрическим характеристикам пламени.

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \int_F \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{s^2} dF \quad (3.76)$$

и характеризующий долю полусферического излучения с элементарной площадью, попавшего на объект ("мишень") (рис.36);

6. Угол отклонения пламени от вертикальной оси под действием ветра рассчитывается по соотношению, предложенному Американской газовой ассоциацией [Аталах, Радж] - рис. 36.

$$\cos \Theta = \begin{cases} 1, u. < 1 \\ u^{-0.5}, u. \geq 1 \end{cases} \quad (3.77)$$

Одной из важных характеристик, необходимых для расчета теплового воздействия пожара на окружающие объекты, является плотность собственного потока излучения (излучательская способность) -  $E$  пламени горящей углеводородной жидкости. По определению излучательная способность пламени открытого пожара представляет собой количество энергии, выходящей в единицу времени с единицы поверхности ("оболочки") пламени в форме радиационного потока. Излучение с различных элементов поверхности пламени неодинаково и зависит от расположения элементарной площадки на внешней поверхности области термохимической реакции (зоны горения), динамики самого процесса, внешних гидродинамических воздействий на пламя и ряда других явлений. В пределах реагирующего объема газов (в зоне горения) происходит одновременно как выделение, так и поглощение тепла. И те и другие процессы зависят при прочих равных условиях от диаметра "конвективной колонки", т.е. от размеров очага горения. Экспериментально установлено, что относительная стабилизация этих процессов, т.е. выравнивание влияния составляющих теплового баланса, наступает для кипящих сжиженных углеводородов при диаметре очага горения примерно 10-15 м. При этом пламя достигает так называемой "предельной оптической плотности" и при дальнейшем увеличении размеров очага горения структура теплового баланса и величина внешнего излучения не изменяется или изменяется уже мало. Для экспертной оценки могут быть рекомендованы значения  $E$  (кВт/м<sup>2</sup>): для СПГ (LNG) - 150-170; для СНГ (LPG) - 50 - 60; для нефтепродуктов - 100 - 120.

Скорость выгорания жидкостей определяют, как правило, экспериментально, что для больших диаметров разлива связано с целым рядом технических сложностей. Для экспертной оценки скорости сгорания (кг/м<sup>2</sup>·сек) можно пользоваться эмпирической формулой, полученной в предположении о пропорциональности доли тепла, поступающего от факела к жидкости, общему тепловыделению в факеле, то есть

$$m = c \gamma_l \cdot \frac{Q_H^p}{\sigma_l} \quad (3.78)$$

где  $c$  - коэффициент пропорциональности;  $\gamma_l$  - плотность насыщенной жидкости;  $Q_H^p$ ,  $\sigma_l$  - низшая теплота сгорания и теплота фазового перехода единицы массы жидкости.

Обработка многочисленных экспериментальных данных показала, что при значении  $c = 1.25 \times 10^{-6}$  м/с эта формула хорошо согласуется с реальными значениями установившихся скоростей выгорания большинства органических жидкостей и их смесей (рис.37).

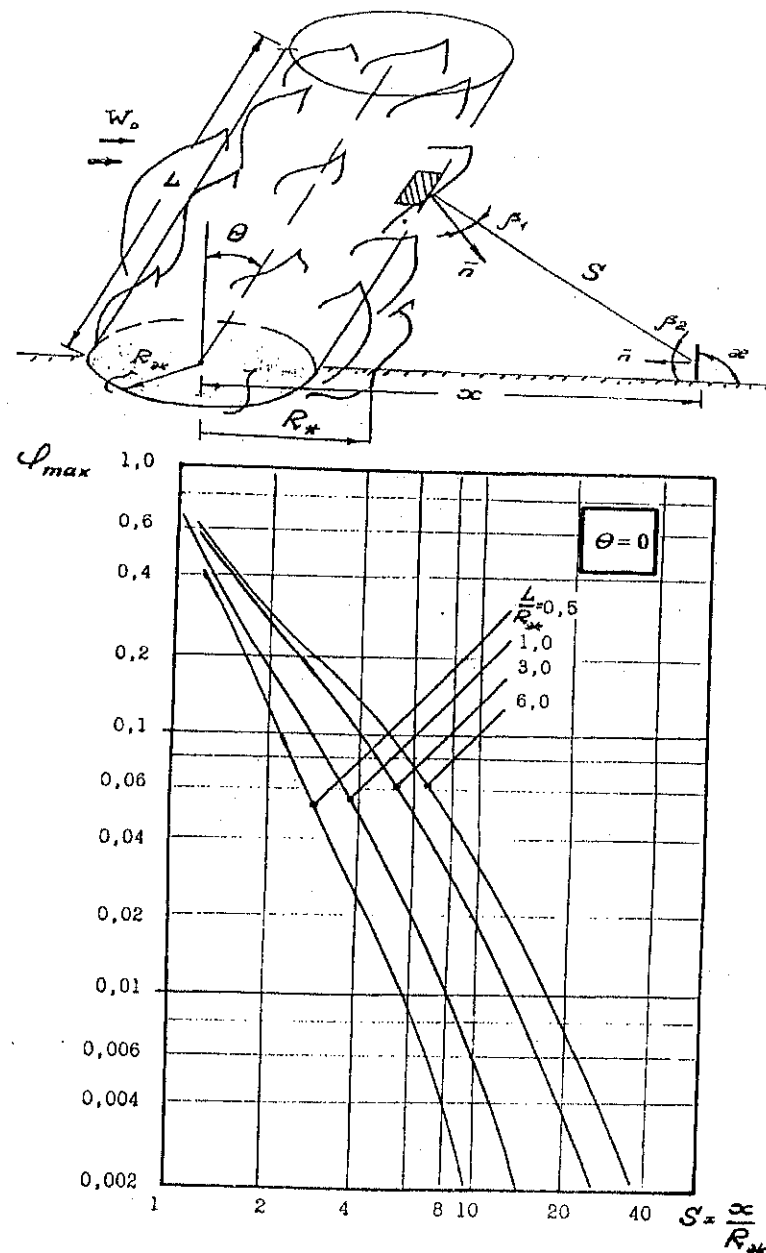


Рис. 36. К расчету угловых коэффициентов облучения от "пожара разлива" на элементарную площадку.

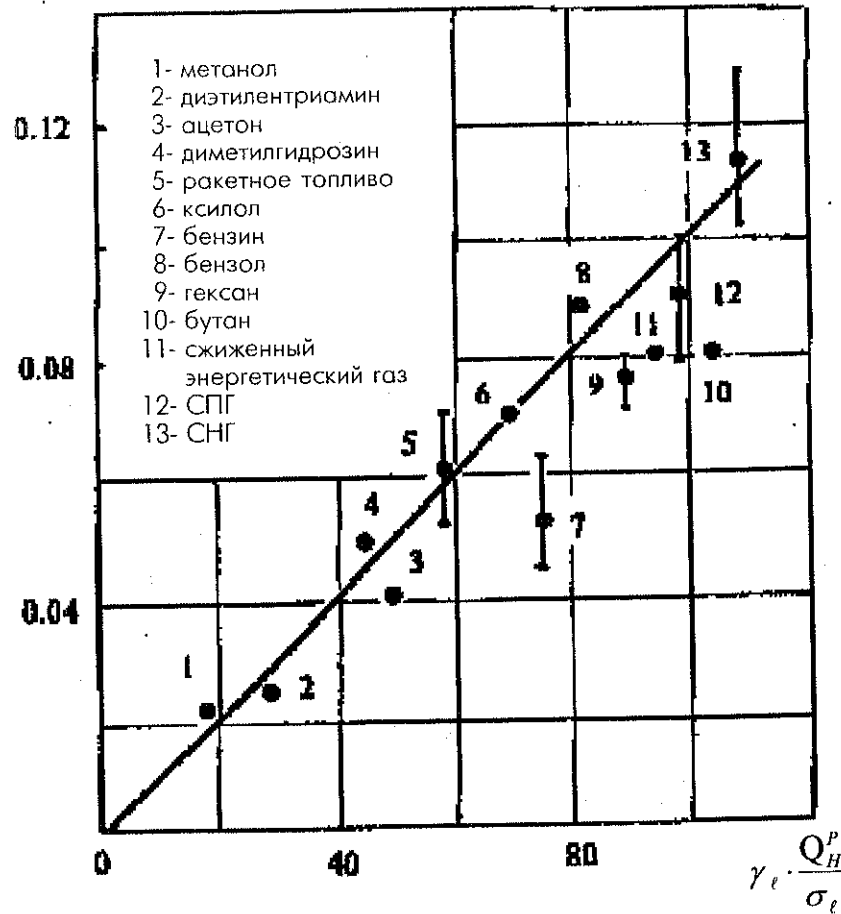


Рис. 37. Обобщение экспериментальных данных по скорости выгорания различных жидкостей.

При реализации за рубежом ряда крупномасштабных экспериментальных программ по изучению закономерностей пожаров сжиженных газов и углеводородных топлив ("AGA" - 1964, "AGA" - 1974, "SHELL" - 1982, "BGC" - 1982 и др.) было обнаружено, что при горении топлива в котлованах без ограничивающих стенок (очаг горения на уровне поверхности земли) наблюдается "волочение" или "переливание" пламени в основании очага горения под действием ветра за край котлована, при котором оно как бы стелется по поверхности земли на довольно значительное расстояние (рис. 36).

Известные данные по этому эффекту обобщены эмпирическим уравнением

$$\frac{R_e}{R_{жк}} = k_1 \left( \frac{W_0^2}{g D_{жк}} \right)^{k_2} \left( \frac{\gamma_{жк}}{\gamma_n} \right)^{k_3} \quad (3.79)$$

Для углеводородных топлив -  $k_1=1.0$ ;  $k_2=0.069$ ;  $k_3=0.48$ ; для сжиженного природного газа -  $k_1=1.5$ ;  $k_2=0.069$ ;  $k_3=0$ .

Следующим этапом анализа теплового воздействия пожара разлива на окружающую среду является расчет угловых коэффициентов облучения прилегающих объектов от пламени. Для этой цели ВНИИГАЗ разработал комплекс математических моделей и программ, позволяющих рассчитать на ЭВМ эпюры облучения с пламени открытых пожаров различных типов при горении нефти, нефтепродуктов сжиженных газов на произвольно ориентированные в пространстве тела плоско цилиндрической и сферической симметрии. Возможности получения аналитических решений при этом ограничены случаем, когда пламя рассматривается в виде повернутого цилиндрического излучателя радиусом  $R_{жк}$  и длиной  $L$  (без учета эффекта "волочения"), а облучаемый объект представлен горизонтальной или вертикально единичной площадкой, расположенной на уровне поверхности грунта, т.е. при  $\chi=\pi/2$  (см. рис.36 при  $R^*=R_{жк}$ )

- для  $\chi=\pi/2$ :

$$\begin{aligned} \pi \Phi_b = & - \frac{\xi \cdot \cos \Theta}{\eta - \xi \cdot \sin \Theta} \cdot a \operatorname{rctg} P + \frac{\xi \cdot \cos \Theta}{\eta - \xi \cdot \sin \Theta} \cdot \frac{\xi^2 + (\eta + l)^2 - 2\eta(1 + \xi \cdot \sin \Theta)}{\lambda \sigma} \times \\ & \times \operatorname{arctg} \left( \frac{P \lambda}{\sigma} \right) + \left\{ \operatorname{arctg} \left[ \frac{\xi \eta - (\eta^2 - 1) \cdot \sin^2 \Theta}{\mu} \right] + \operatorname{arctg} \left[ \frac{(\eta^2 - 1) \cdot \sin \Theta}{\mu} \right] \right\} \times \\ & \times \frac{\cos \Theta}{\sqrt{1 + (\eta^2 - 1) \cdot \cos^2 \Theta}} \end{aligned} \quad (3.80)$$

- для  $\chi=0$ :

$$\begin{aligned} \pi \Phi_r = & \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{P} \right) + \frac{\sin \Theta}{\sqrt{1 + (\eta^2 - 1) \cos^2 \Theta}} \times \\ & \left\{ \operatorname{arctg} \left[ \frac{\xi \eta - (\eta^2 - 1) \sin \Theta}{\mu} \right] + \operatorname{arctg} \left[ \frac{(\eta^2 - 1) \sin \Theta}{\mu} \right] \right\} - \\ & - \frac{\xi^2 + (\eta + l)^2 - 2(\eta + l) + \xi \eta \sin \Theta}{\lambda \sigma} \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{\lambda}{\sigma} \cdot P \right] \end{aligned} \quad (3.81)$$

где

$$P = \frac{\eta - 1}{\sqrt{\eta + 1}}; \quad \lambda = \sqrt{\xi^2 + (\eta + 1)^2 - 2\xi(\eta + 1) \sin \Theta};$$

$$\sigma = \sqrt{\xi^2 + (\eta - 1)^2 - 2\xi(\eta - 1) \sin \Theta};$$

$$\mu = \sqrt{\eta^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + (\eta^2 - 1) \cos^2 \Theta}; \quad \eta = \frac{X}{R_{\text{ЭК}}}; \quad \xi = \frac{L}{R_{\text{ЭК}}}$$

Максимальное значение коэффициента облученности для некоторой произвольно ориентированной площадки рассматривается как векторная сумма его значений для горизонтально и вертикально ориентированных площадок:

$$\Phi_{\text{max}} = \sqrt{\Phi_r^2 + \Phi_b^2}.$$

Значения  $\Phi_{\text{max}}$  для вертикального пламени  $\theta=0$  представлены на рис.36.

В качестве характерного примера в таблице 14 представлены рассчитанные значения тепловых потоков на уровне поверхности грунта при горении ШФЛУ в котлованах с радиусом 25 м и 50 м.

В этом же разделе представляется целесообразным дать зависимость для расчета длины газожидкостного факела, образующегося при истечении двухфазного потока из вертикальных и горизонтальных труб. По данным ВНИИПО МВД РФ [2] для случаев истечения сжиженных углеводородов из трубопроводов диаметром  $d_0 \leq 50$  мм, при рабочих давлениях до 10 ат длина факела ( $L, \text{м}$ ) связана с интенсивностью истечения ( $G$ ; кг/с) зависимостью:

$$L = 15 \cdot G^{0,43} \quad (3.82)$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Mudan K.*, Thermal radiation hazard from hydrocarbon pool fires. "Propr. Energy and Combust.Sci" 1984, 10, 1, pp.59-80.

2. *А.П.Федотов, А.М.Чугуев, Н.В.Полов, Н.В.Куликов* "Двухфазное истечение и горение сжиженных углеводородных газов при разрушениях трубопроводов", 1-ый Международный семинар "Пожаро-взрывоопасность веществ, Взрыво-пожарозащита объектов", М., 14-21 июля 1995 г.

Таблица 14  
Значения удельных тепловых потоков, падающих на горизонтальную мишень при горении разлива ШФЛУ

СКОРОСТЬ ВЕТРА- 0 м/сек													
Радиус разлива, м	25												
Длина пламени, м	69,71												
Расстояние от центра очага пожара до "мишени", м	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120			
	112,85												
Уд.тепловой поток, кВт/м²	15,45	10,08	7,15	5,21	3,90	2,95	15,37	12,03	9,76	8,00	6,65	4,65	
СКОРОСТЬ ВЕТРА,м/сек : 5/10													
Длина пламени, м	66,2/62,74												
Угол наклона пламени, град	40,61/57,53												
Большая полуось очага пожара, м	30,54/33,61												
Положение "мишени"													
Расстояние от центра очага пожара до "мишени", м	С подветренной стороны					С наветренной стороны			На прямой, перпендикул. направлению ветра				
	40	60	80	100	120	40	60	80	100	120	30	40	50
Уд. тепловой поток, кВт/м²	28,72	17,51	10,15	5,33	2,73	3,26	1,48	13,33	7,90	5,38	3,84	2,24	2,24
СКОРОСТЬ ВЕТРА, м/сек : 5/10													
Длина пламени, м	107,2/101,5												
Угол наклона пламени, град	57,53/52,91												
Большая полуось очага пожара, м	33,61/64,08												
Положение "мишени"													
Расстояние от центра очага пожара до "мишени", м	С подветренной стороны					С наветренной стороны			На прямой, перпендикул. направлению ветра				
	60	90	120	150	180	60	90	120	150	180	60	70	90

## 6. Термическое воздействие на окружающую среду при возникновении огневого шара.

Одним из возможных сценариев развития аварий на объектах СУГ является образование огневых шаров и взрывные явления типа "BLEVE" ("Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion"). Данный сценарий характеризуется совокупностью физических процессов, сопровождающих взрывное вскипание углеводородных жидкостей в резервуарах высокого давления, выброс содержимого резервуара в окружающее пространство с образованием быстро сгорающего аэрозольного облака (огневого шара) и ударной волны, а также с разрушением сосуда и разлетом его осколков.

Для возникновения "BLEVE" необходимы следующие предпосылки:

1. Жидкость, хранящаяся в герметичном сосуде под давлением, к моменту вскипания (за счет сброса давления) должна быть "термодинамически перегретой" выше некоторого характерного предела относительно состояния насыщения при атмосферном давлении - рис.38.

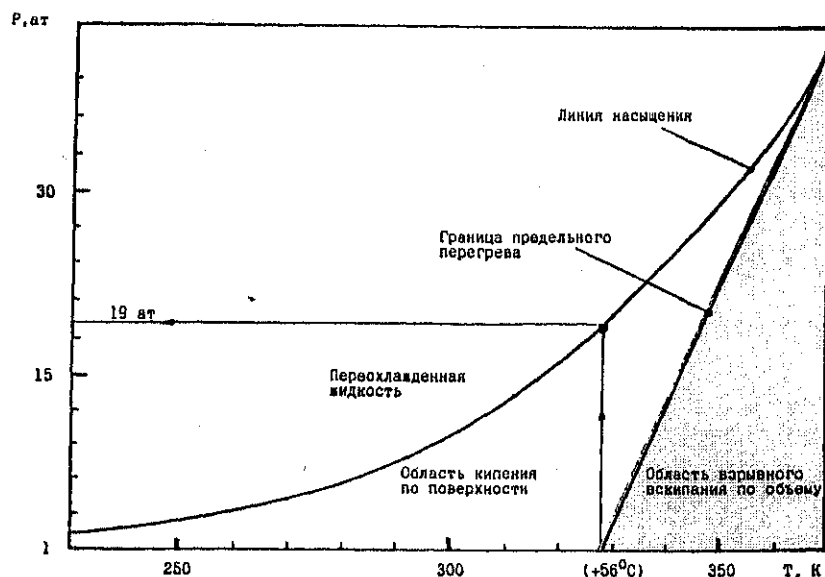


Рис. 38. Термодинамическая граница предельного перегрева сжиженного пропана.

2. В результате аварийной разгерметизации несущего корпуса (либо неправильной работы предохранительных клапанов или разрывных мембран) должно произойти резкое падение давления над поверхностью раздела жидкой и паровой фаз.

Аварийная разгерметизация корпуса может в принципе происходить за счет:

-внешних механических воздействий (осколки от разрушения других сосудов, переворачивание и пробой цистерн во время транспортировки и т.п.);

-внешних тепловых воздействий, таких как локальный перегрев корпуса и связанное с этим резкое снижение его механической прочности.

3. Величина термодинамической метастабильности жидкости при сбросе давления должна достигнуть "области локального перегрева", при которой происходит мгновенное вскипание перегретой жидкости по всему объему, за счет высокой плотности центров парообразования (до  $10^6$  в одном кубическом миллиметре).

В тех случаях, когда при сбросе давления не достигается граница перегрева мгновенного вскипания жидкости в объеме не происходит. За счет возникшей неустойчивости, т.е. временного термодинамического перегрева, происходит превращение части внутренней энергии в тепло, которое далее реализуется испарением жидкости (по обычному механизму поверхностного кипения на центрах парообразования), и, как следствие, к равномерному понижению температуры по всей жидкости.

При "провале" за границу предельного перегрева произойдет "паровой взрыв". Давление в сосуде может возрасти в сотни раз, вследствие чего сосуд будет разорван. За счет резкого сброса давления часть жидкости превратится в пар, а оставшаяся часть уже "переохлажденной" жидкости будет практически полностью захвачена резко расширяющимся паром и вынесена с ним в окружающее пространство в виде аэрозоля. В результате образуется аэрозольное облако расширяющихся паров, которое с большой вероятностью (0,7 - 0,8) воспламенится за счет взаимодействия разрушающихся частей сосуда и будет сгорать с высокой интенсивностью и мощным излучением тепла в окружающее пространство.

За счет исходного эффекта расширения при разрушении сосуда высокого давления, а также за счет расширения продуктов сгорания образуется ударная волна, способная вызвать достаточно серьезные разрушения в прилегающей зоне (рис. 39).

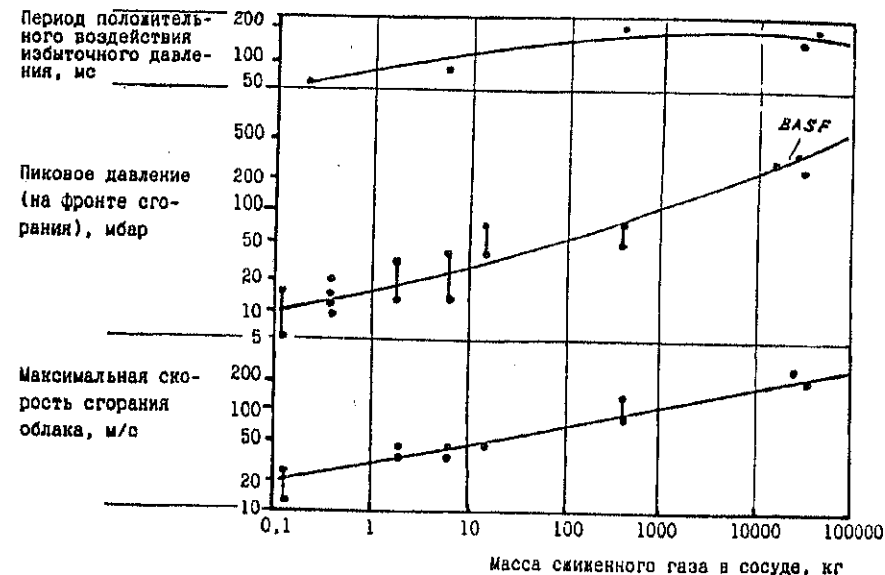


Рис. 39. Обобщение экспериментальных данных по взрывному сгоранию сжиженных углеводородных газов при разрушении сосудов.

Дополнительным фактором опасности при возникновении эффекта "BLEVE" являются осколки от разорвавшегося корпуса, увеличивающие зону потенциальной угрозы вокруг резервуаров для хранения сжиженных газов при температуре окружающей среды (рис.41).

При быстротечном сгорании облака, как уже отмечалось, происходит мощное излучение тепла в окружающее пространство, способное вызвать возгорание легко воспламеняющихся конструкций и термическое поражение людей на значительных расстояниях от места аварии.

В таблице 15 представлены данные по ряду характерных промышленных аварий с образованием огневых шаров [1].

Транспортные аварии с образованием огневых шаров

Таблица 15

№	Дата аварии	Место происшествия	Вещество	Масса топлива, тн	Диаметр шара, м
1	17.01.1974	Абедин, Великобритания	бутан	2	30
2	03.03.1972	Линчберг, шт.Виргиния, США	пропан	9	60
3	11.01.1974	Сент-Пол, шт.Миннесота, США	СНГ	10	50
4	29.04.1979	Игл-Пасс, шт. Техас, США	СНГ	25	170
5	05.06.1973	Кингмен, шт.Виргиния, США	пропан	45	150
6	28.12.1977	Голдана, шт.Виргиния, США	СНГ	70	160
7	21.06.1970	Кресент-Сити, шт.Иллинойс, США	пропан	75	75-100
8	26.11.1976	Белт, шт.Монтана, США	СНГ	80	150
9	29.08.1978	Луисвилл, шт.Арканзас, США	мономерный винилхлорид	110	155
10	19.10.1971	Хьюстон, шт.Техас, США	мономерный винилхлорид	165	150
11	04.08.1978	Доннелсон, шт.Айова, США	СНГ трубопровод	435	305

Обработка этих данных, а также ряда других специальных экспериментов позволили получить следующие выражения для расчета диаметра ( $D_{FB}, м$ ) и времени существования ( $\tau, с$ ) огневого шара в функции выброшенной в атмосферу массы ( $M, тн$ ) сжиженного газа

$$D_{FB} = 55 M^{0,375}$$

$$\tau = 3,8 \sqrt{M} \quad (3.83)$$

Общая тепловая мощность сгорания огневого шара ( $M, тн; \tau, с$ )

$$P_{FB} = \frac{M}{1000 \cdot \tau} Q_H$$

Вещества, часто приводящие при авариях к образованию огневого шара, имеют теплоту сгорания -  $Q_H$ , как правило, порядка 45-48 МДж/кг.

Средняя мощность излучения, т.е. интенсивность излучения тепла с единицы поверхности шара

$$I_s = (P_{FB} F_R) / (4\pi R_{FB}^2), \quad (3.84)$$

где  $F_R$  - доля энергии теплового излучения в общем тепловыделении.

Анализ данных по огневым шарам показывает, что доля излучения ( $F_R$ ) изменяется в диапазоне 0,15 - 0,45. Величина  $F_R$  зависит от начального давления паров, высокое давление паров перед разрушением сосуда приводит к большей дисперсности жидкости, более интенсивному горению и более высокой температуре поверхности огневого шара. Для экспертной оценки можно рекомендовать для расчета зависимости  $F_R$  от давления (МПа) формулу (Хасэгава; Саго)

$$F_R = 0,27 P^{0,32}$$

Поток тепла, падающий на единичную горизонтальную площадку от огневого шара выражается в общем виде как:

$$I_t = I_s \cdot \phi \cdot v \quad (3.85)$$

где  $\phi$  - "фактор видения" (коэффициент облучения).

В рассматриваемом случае (см рис. 40) для определения  $\phi$  может быть использована следующая формула [2]:

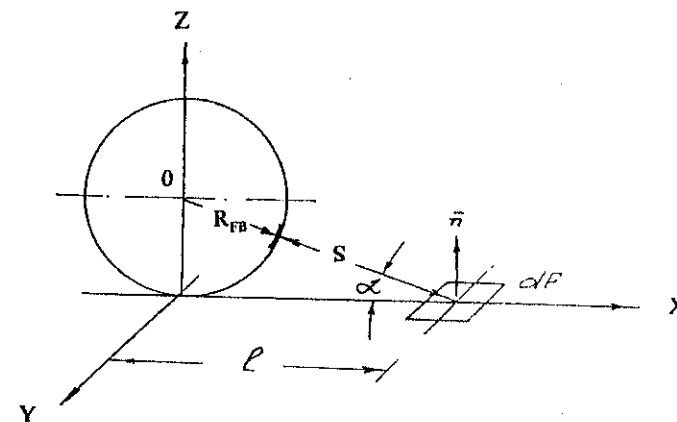


Рис. 40. К расчету угловых коэффициентов облучения от "огневого шара" на площадку на уровне поверхности земли.



$$\varphi = \frac{\sqrt{(L^2 + H^2 - 1)(1 - H^2)}}{\pi(L^2 + H^2)} + \frac{1}{\pi} \arctg \sqrt{\frac{1 - H^2}{L^2 + H^2 - 1}} - \frac{H}{\pi(L^2 + H^2)^{3/2}} \arccos \frac{H\sqrt{L^2 + H^2 - 1}}{L}, -1 \leq H \leq 1 \quad (3.86)$$

где  $H = \frac{R}{R_{FB}}$ ;  $L = \frac{\ell}{R_{FB}}$ ;  $R = R_{FB} + S$

Приведенная формула не учитывает ослабления излучения (монохроматическое излучение газообразных продуктов сгорания -  $CO_2$ ,  $H_2O$ ) при прохождении потока через атмосферу, в то время как этот эффект играет определенную роль в оценке теплового воздействия огневых шаров.

Для определения коэффициента ослабления излучения (в основном парами воды) в однородной атмосфере рекомендуется следующая формула (S,m):

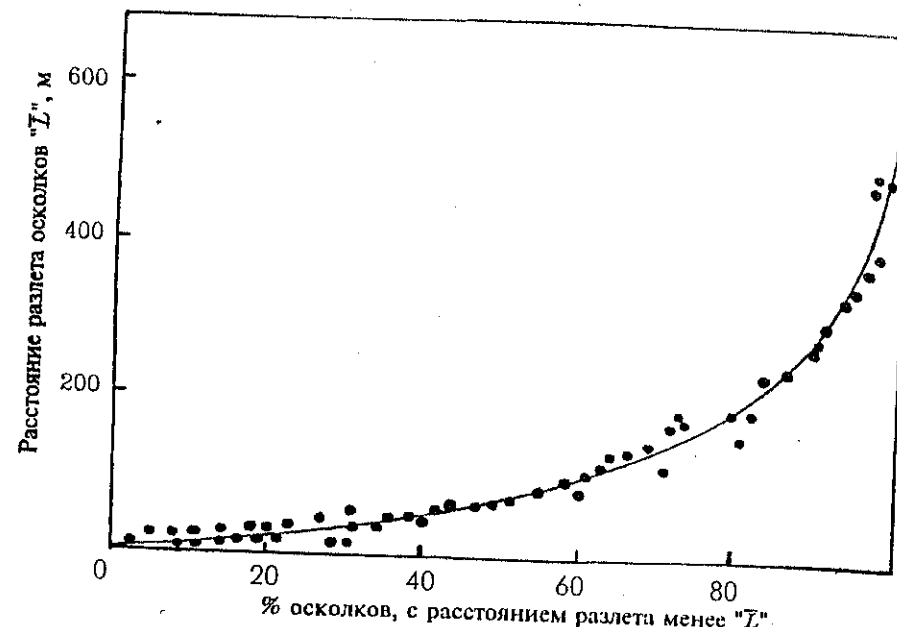
$$v = 1,00 - 0,12 \cdot \lg S$$

Как было отмечено выше, аварийное разрушение по типу "BLEVE" сосудов со сжиженными углеводородами сопровождается формированием воздушной ударной волны. На рис. 39 обобщены известные экспериментальные данные, а также данные фактических наблюдений по величинам пикового избыточного давления при возникновении эффекта "BLEVE". Как видно, максимальные величины избыточного давления не превышают 0,5 ат, что не представляет серьезной угрозы для людей, но может вызвать определенные разрушения легких конструкций.

Одним из поражающих факторов при возникновении аварий типа "BLEVE" на резервуарах с сжиженными углеводородными газами является разлет осколков при разрушении резервуара.

Анализ статистики по 130 авариям типа "BLEVE" показывает, что в 89 случаях наблюдали огневой шар с разлетом осколков, в 24 - просто огневой шар, а в 17 случаях - только разлет осколков. Результаты статистических данных обобщены на рис.41 в виде ожидаемого расстояния разлета осколков при разрыве сосуда с СУГ. Заметим, что количество осколков обычно не превышало 3-4 шт., лишь в одном случае произошло разрушение с образованием 7 осколков.

Анализ этих данных свидетельствует о том, что в 90% случаев разлет осколков происходит на расстояние не более 300 м и, как правило, находится в пределах расстояний опасного для людей термического радиационного воздействия от огневого шара. Поэтому при оценке последствий аварий типа "BLEVE" следует прежде всего рассчитывать зоны термического поражения.



**Рис. 41.** Обобщение данных по разлету осколков при аварийных разрушениях сосудов для сжиженных углеводородных газов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Маршалл В. Основные опасности химических производств. М., 1989, 672 с.
2. Lanooy A. Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre. Paris, Imprimerie Louis-Jean, 1984, 390 p.
3. Handbook of Chemical Hazards Analysis Procedures, USA, Washington, 1992.
4. Roberts A. Thermal radiation hazard from releases of LPG from Pressurised Storage// Fire Safety J. 1981-1982, 4, №3, pp.197-212.

# КРИТЕРИИ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ХАРАКТЕРНЫХ АВАРИЙ НА ЧЕЛОВЕКА И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

После сбора информации о регионе и технологической специфике потенциально опасных объектов следующим этапом исследования должно явиться определение критериев допустимого воздействия этих объектов на человека и окружающую среду. Этот этап является весьма важным, поскольку принятые критерии являются базовыми характеристиками как для расчета масштабов переноса вещества или распространения энергии, так и последствий от действия аварийных процессов или систематического загрязнения природной среды.

Исходя из специфики объектов химической технологии, основными физиологическими и биологическими факторами поражения для человека являются: барические эффекты (взрывы паров и газов), термическая радиация (пожары разливов, огневые шары, струевые пламена), механические воздействия при разрушениях конструкций от взрывных или иных явлений, токсические воздействия вредных веществ при их попадании различными путями в организм человека.

Известно, что в общем случае одна и та же мера воздействия (количество поглощенного вещества, доза термической радиации или импульс давления) может вызвать последствия различной степени тяжести у различных людей, т.е. "эффект поражения" носит вероятностный характер. Величина поражения ( $P_{пор}$  измеряется в долях единицы или процентах) выражается, как правило, функцией Гаусса (функцией ошибок), записываемой в виде:

$$P_{пор} = f(Pr) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} e^{-t^2/2} dt, \quad (4.1)$$

в которой верхний предел интегральной функции является так называемой пробит-функцией, отражающей связь между вероятностью поражения и поглощенной дозой. Пробит-функция может быть вычислена по уравнению вида:

$$Pr = a + b \times \ln(D),$$

где  $a$  и  $b$  - константы для каждого вещества или процесса, характеризующие специфику и меру опасности его воздействия,  $D$  - поглощенная субъектом доза негативного воздействия.

В ряде западных исследований наряду с уравнением (4.1) применяется интегральная функция вида:

$$P_{пор} = f(Pr-5) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr-5} e^{-t^2/2} dt$$

Поскольку масштаб поражения  $P_{пор}$  определяется в долях единицы или в процентах, в таблице 16 приведен перевод значений пробит-функции вида  $f(Pr-5)$  в проценты поражения:

Перевод значений пробита в процент поражения

Таблиц

$P_{пор} (\%)$	Значения функции в $f(Pr-5)$				
	0	2	4	6	8
0	-	2.95	3.25	3.45	3.59
10	3.72	3.82	3.92	4.01	4.08
20	4.16	4.23	4.29	4.36	4.42
30	4.48	4.53	4.59	4.64	4.69
40	4.75	4.80	4.85	4.90	4.95
50	5.00	5.05	5.10	5.15	5.20
60	5.25	5.31	5.36	5.41	5.47
70	5.52	5.58	5.64	5.71	5.77
80	5.84	5.92	5.99	6.08	6.18
90	6.28	6.41	6.55	6.75	7.05
99	7.33	7.41	7.46	7.65	7.88

Примеры расчета масштаба поражения ( $P_{пор}$ ) с помощью пробит-функции приведены в разделе Е настоящей главы. Там же указан практический подход к выбору  $f(Pr)$  или  $f(Pr-5)$ .

Перейдем к рассмотрению конкретных факторов поражения человека.

## А. Термическое воздействие на человека

Данное воздействие связано с прогревом и последующим биохимическими изменениями верхних слоев кожного покрова. По данным Беттнера человек ощущает сильную ("едва переносимую") боль, когда температура верхнего слоя кожного покрова (~0,1 мм) повышается до 45 °С. Время достижения "порога боли" (в сек) связано с интенсивностью теплового воздействия ( $kBt/m^2$ ) зависимостью

$$t = (35/q)^{1.33} \quad (4.2)$$

Степень повреждения кожи при воздействии высоких температур зависит от величины и длительности теплового излучения. При относительно слабом тепловом излучении будет повреждаться только верхний слой (эпидермис) на глубину ~1 мм. Более интенсивный тепловой поток может привести к поражению не только эпидермиса, но и дермы (нижний слой), а излучение еще большей интенсивности будет

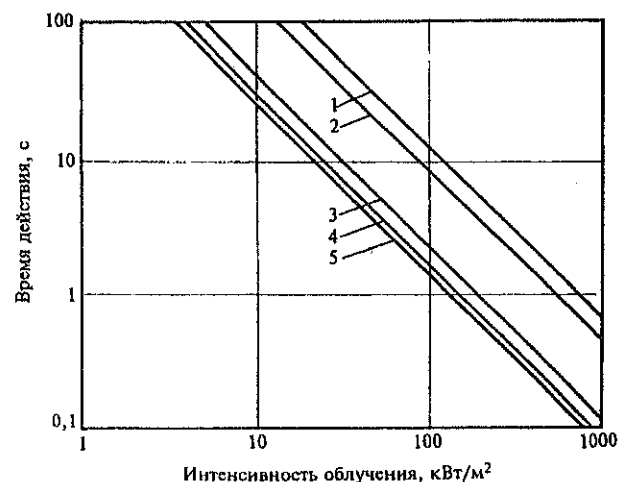
воздействовать и на подкожный слой. Эти три уровня в целом качественно соответствуют установленным категориям ожогов I-й, II-й и III-й степеней.

Установлено, что при длительном тепловом воздействии интенсивностью менее 1,7 кВт/м<sup>2</sup> боли не ощущаются.

При достижении поверхностным покровом кожи температуры 55 °С появляются волдыри (ожог II степени). По данным А.Мента тяжесть ожога зависит при этом от количества энергии, поглощенной кожным покровом после достижения температуры в 55 °С. Если она равна 42 кДж/м<sup>2</sup> - воздействие характеризуется умеренным ожогом II степени; 84 кДж/м<sup>2</sup> - тяжелым ожогом II степени; 162 кДж/м<sup>2</sup> - тяжелым ожогом III степени.

Важным показателем является уровень теплового воздействия на человека, при котором становится вероятным смертельный исход. По данным К. Мьюдана здоровые взрослые люди и подростки выживают, если ожоги II и III-ей степени охватывают менее 20% поверхности тела (процентное соотношение участков тела: голова- 7, руки от кисти до плеча -14, кисти рук-5). Выживаемость резко снижается даже при интенсивной медицинской помощи, если ожоги II и III степени составляют 50% и более от поверхности тела [1].

Н.Эйзенбергом были проанализированы данные по увечьям от ожогов и смертельным случаям при различных уровнях радиационного теплового воздействия на человека (полигонные ядерные взрывы различной мощности). Результаты приведены на рис. 42. Для 1% случаев ожидаемого летального исхода (в 99% и более - тяжелые увечья) - кривая 3, для 50% - кривая 2 и для 100% летального исхода - кривая 1. Там же (кривая 4) представлены данные по ожогам II степени, собранные Микстером. Кривая 5 соответствует порогу увечья. Федеральным стандартом США СПГ допускается кратковременное тепловое воздействие на человека мощностью в 5 кВт/м<sup>2</sup>. При таком воздействии ожоги II-ой степени могут возникнуть примерно через 40 сек. Уровень теплового воздействия, при котором за тот же промежуток времени вероятен летальный исход, соответствует примерно 10 кВт/м<sup>2</sup>.



**Рис. 42** Результат действия теплового излучения на человека (1- 100% летального исхода; 2 - 50%; 3 - 1%; 4 - ожоги II степени; 5 - порог увечий от ожогов).

Вероятность смертельного поражения при термическом воздействии определяется по Н. Эйзенбергу через пробит-функцию и связана с так называемым "индексом дозы" (произведение интенсивности излучения на длительность прямоугольного теплового импульса) выражением [2]:

$$Pr = -14.5 + 2.56 \ln(q^{4/3} \tau \times 10^{-4}) \quad (4.3)$$

где  $q$  - характеризует действующий на человека тепловой поток (Дж/м<sup>2</sup>с), а  $\tau$  - длительность воздействия (с).

Расчеты по этой формуле приведены в таблице 17. Они использованы также в примере вычисления масштабов теплового поражения при разрушении по типу BL-VE стандартного горизонтального наземного резервуара объемом 200 м<sup>3</sup>, в котором хранится под давлением насыщенных паров сжиженный пропан. Температуры воздуха + 15 °С. Результаты расчетов даны в табл. 18.

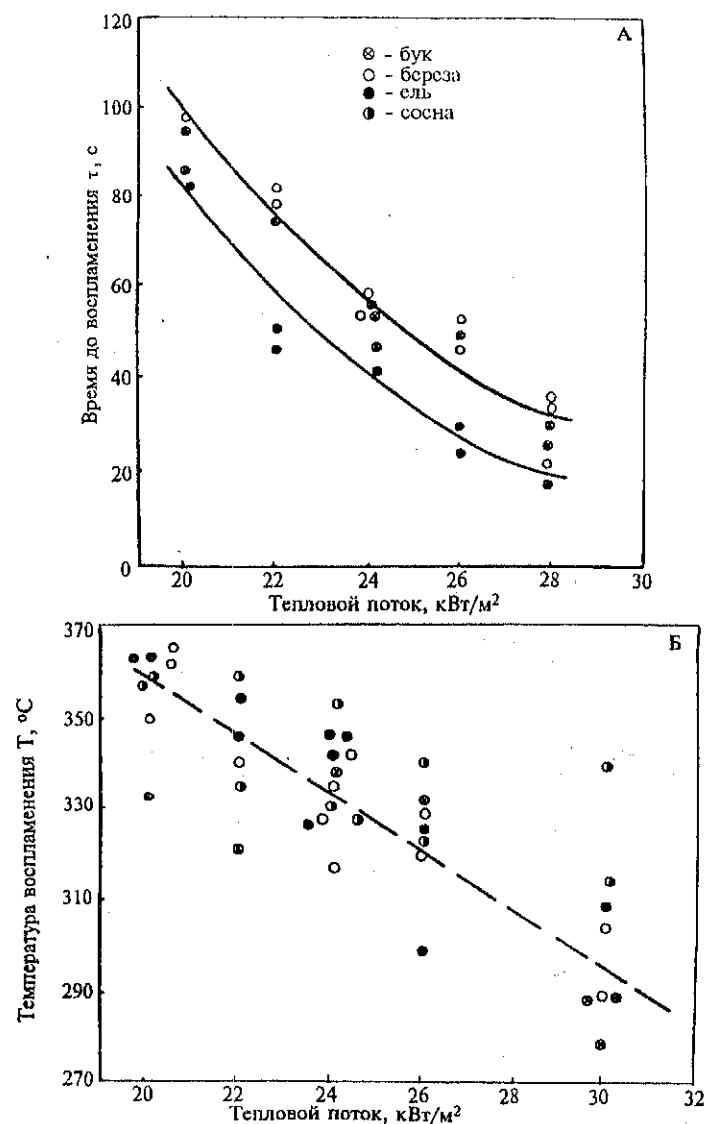
Относительная вероятность поражения ( $P_{пор}$ )	Индекс дозы $q^{4/3} \tau$
0,01	$1 \times 10^7$
0,5	$2,3 \times 10^7$
0,99	$6,5 \times 10^7$

**Масштабы теплового поражения от огневого шара массой 100 т.** Таблица 1:

Масштабы теплового поражения (доля лиц, получивших смертельное поражение), $P_{пор}$	Радиус поражения, м
(неподвижное состояние субъекта)	
99% случаев смертельного поражения	220
50% случаев смертельного поражения	330
Порог смертельного поражения («1%»)	440
Ожог III-й степени	700

### **В. Термическое воздействие на легковоспламеняющиеся вещества**

Воспламенение в окружающем пространстве различных веществ и материалов под действием термической радиации от пожара на каком-либо технологическом объекте может в принципе вызвать дальнейшее разрастание аварии и переход ее в стадию каскадного развития. Следует также учитывать, что, согласно имеющейся статистике, распространение и развитие пожаров в производственных помещениях происходит в основном по материалам, сырью и технологическому оборудованию (42%), а также по сгораемым строительным конструкциям (36%). Среди последних для нас наибольший интерес представляют древесина и пластики [3,4].



**Рис. 43.** Зависимость времени (А) и температуры (Б) воспламенения от интенсивности теплового потока.

На рис.43 представлены экспериментальные данные по времени задержки воспламенения и температуре воспламенения в зависимости от уровня теплового потока для характерных видов древесины малой влажности в неподвижной атмосфере.

Заметим, что для воспламенения твердого материала от источника зажигания необходимо создать над его поверхностью горючую парогазовую смесь продуктов пиролиза с воздухом. Этот процесс зависит от влажности материала, скорости величины потока излучения, что проиллюстрировано в таблице 19.

**Зависимость времени задержки ( $\tau$ , сек) воспламенения окрашенной белой древесины (сосна) от влажности при различных скоростях набегающего потока воздуха и плотности потока излучения.**

Таблица

q  кВт  м²	влажность %											
	0%			30%			40%			50%		
	скорость ветра, м/с											
	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	4
100	56.5	75.5	87	91	106	124.5	112	131	148	164	184	200
150	48	55	62	71	82	92.5	101	107	117	136	150	170
200	12	24.5	31.5	30.5	38.5	40.5	49	55	63	79.5	86.5	94

В таблице 20 в качестве справочного материала для оценки последствий в действия приведены значения допустимых тепловых нагрузок  $q_{кр'}$  при которых происходит воспламенения веществ и материалов при длительных тепловых нагрузках, а также значения времени воспламенения ( $\tau_v$ ) для характерных легковоспламеняющихся веществ и строительных материалов в диапазоне тепловых потоков от до 200 кВт/м<sup>2</sup> [5].

**Характеристики критических тепловых нагрузок ( $q_{кр'}$ ) и времени воспламенения ( $\tau_v$ ) от плотности теплового потока ( $q$ ) для различных веществ и материалов.**

Таблица

Вещество, материал	$q_{кр'}$ , кВт/м <sup>2</sup>	Время воспламенения $\tau_v$ , сек				
		плотность теплового потока $q$ , кВт/м <sup>2</sup>				
		20	50	100	150	200
Солома	7.0	70.3	10.2	2.9	1.4	0.91
Пенопласты типа ПСБ, ППУ, ФРП	7.40	73.7	10.3	2.9	1.5	0.91
Хлопок-волокно	7.50	74.7	10.4	2.9	1.5	0.92
Темная вискоза или тяжелые х/б ткани	8.37	83.9	10.7	3.0	1.5	0.92
Торф кусковой	9.8	103.6	11.4	3.1	1.5	0.93

Вещество, материал	$q_{кр'}$ , кВт/м <sup>2</sup>	Время воспламенения $\tau_b$ , сек				
		плотность теплового потока $q$ , кВт/м <sup>2</sup>				
Картон серый	10.8	122.4	11.8	3.1	1.5	0.94
Картон фибровый	10.88	124.1	11.9	3.1	1.5	0.94
Темная древесина, ДСП, хлопконабивная ткань	12.56	172.3	12.7	3.2	1.5	0.96
Бензин А-66	12.6	173.8	12.8	3.2	1.6	0.96
Древесина сосновая шероховатая	12.8	181.5	12.9	3.3	1.6	0.96
Торф брикетный	7.0	70.3	10.2	3.3	1.6	0.96
Резина	7.0	70.3	10.2	3.4	1.6	0.97
Битумная кровля	7.0	70.3	10.2	3.4	1.6	0.97
Пластик слоистый типа гетинакс	7.0	70.3	10.2	3.4	1.6	0.98
Фанера	7.0	70.3	10.2	3.5	1.6	0.99
Бензин А-74	7.0	70.3	10.2	3.5	1.7	1.00
Древесина сосновая, крашенная масляной краской, пергамин	7.0	70.3	10.2	3.6	1.7	1.00
Древесина с обугленной поверхностью	7.0	70.3	10.2	3.7	1.7	1.02

Анализ представленных данных показал, что в большинстве случаев зависимость времени воспламенения от величины теплового потока можно описать в виде:

$$\tau_b = A / (q - q_{кр})^n$$

где  $A$  и  $n$  - константы для конкретного вещества (например, для древесины:  $A=4360$ ,  $n=1.61$ )

Последствия действия меньших тепловых потоков даны в табл.21.

**Плотность теплового потока и результат теплового воздействия** Таблиц

Объект, на который направлено воздействие	Тепловой поток, кВт/м <sup>2</sup>		
	4,2	8,4	10,5
Окрашенные металлические конструкции	без изменений	вспучивание краски	обгорание краски
Деревянные конструкции	то же	разложение	обугливание
Резина, одежда, ткань	то же	обугливание	загорание

В таблице 22 представлены значения "критической" интенсивности облучения баков (резервуаров) с такими нефтепродуктами, нагревание которых до температуры их самовоспламенения способно привести к взрыву сосуда.

Время действия, мин.	5	10	15	20	29	>30
"Критическая" интенсивность облучения, кВт/м <sup>2</sup>	34,9	27,6	24,8	21,4	19,9	19,5

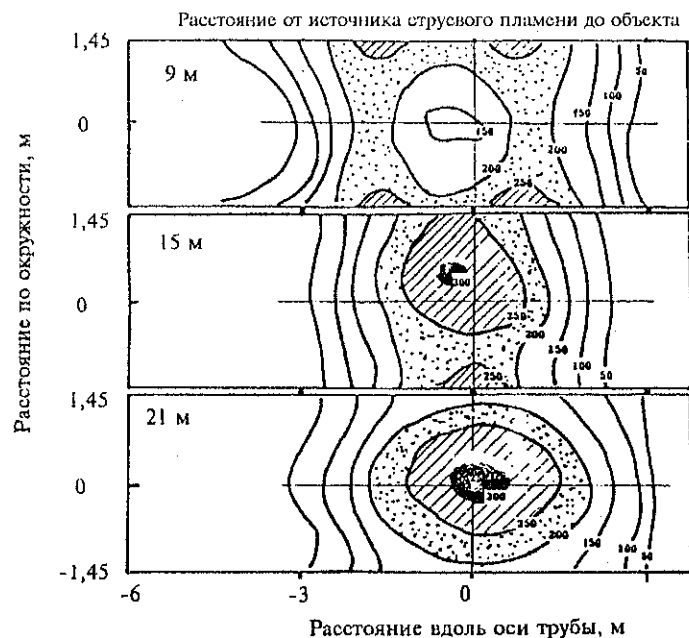
\*) для нефтепродуктов с температурой самовоспламенения  $\leq 235^\circ\text{C}$  при степени черноты поверхности резервуара 0,35.

### С. Термическое воздействие на строительные конструкции

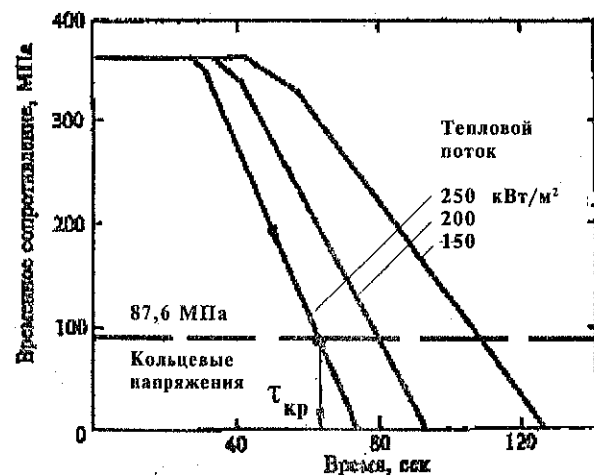
Опасность термического воздействия на несущие строительные конструкции связана со значительным снижением их прочностных характеристик при повышении температуры выше определенных значений.

Степень устойчивости сооружения к тепловому воздействию зависит от так называемого предела огнестойкости конструкции, характеризуемого временем, истечении которого происходит потеря несущей способности. Как показано в экспериментальных работах, прочность материалов может быть охарактеризована так называемой критической температурой прогрева, которая для стальных балок, ферм и перегородок находится в пределах  $470 - 500^\circ\text{C}$ , для металлических сварных и жестко заземленных конструкций она значительно меньше и лежит в пределах  $300 - 350^\circ\text{C}$ .

В качестве иллюстрации на рис. 44 показаны измеренные "British Gas" эпюры тепловых нагрузок на трубу диаметром 900 мм (технологическую колонну) от источника струевого пламени метана, а на рис. 45 - рассчитанное время термической устойчивости трубопроводной технологической обвязки, по истечении которого происходит ее разрушение при тепловых потоках, характерных для прямого огневого воздействия.



**Рис. 44.** Распределение теплового потока ( $\text{кВт/м}^2$ ) по поверхности трубы  $D_y=900$  мм при прямом воздействии струйного пламени. (Истечение метана из трубы  $D_y=75$  мм с расходом  $8,5$  кг/с).



**Рис. 45.** Развитие термических напряжений и время устойчивости трубного элемента  $D=100 \times 7$  мм,  $P=100$  ат. при прямом огневом воздействии.

При проектировании зданий и сооружений используют железобетонные конструкции, предел огнестойкости которых значительно выше, чем у металлических. Так, предел огнестойкости железобетонных колонн сечением  $20 \times 20$  см - 2 ч, сечением  $30 \times 50$  см - 3,5 ч. С увеличением площади сечения предел огнестойкости железобетонной конструкции возрастает.

Потеря несущей способности изгибаемых, свободно опертых элементов плит, балок и т.д. наступает от прогрева растянутой арматуры до критической температуры  $470-500$  °С. Предел огнестойкости предварительно напряженного железобетона примерно такой же, как у конструкций с ненапряженной арматурой. Особенности напряженных конструкций - образование необратимых деформаций при их прогреве уже до  $250$  °С, после чего их нормальная эксплуатация невозможна.

В табл. 23 представлена критическая температура прогрева для некоторых строительных материалов.

Таблица 2

Материал	Критическая температура прогрева, °С
Полимерные материалы	150
Стекло	200
Алюминий	250
Сталь	500

#### Д. Барическое воздействие взрыва на технологическое оборудование и человека

Горение парового облака (как правило, в режиме дефлаграции со скоростью  $250 - 300$  м/с) формирует в окружающей среде воздушную волну избыточного давления. Для верхней оценки воздействия газового взрыва на окружающую среду инженерной практике обычно используют аналогию со взрывами твердых веществ (как правило, тринитротолуола - "ТНТ"). Эффекты разрушения достаточно хорошо описаны в специальной литературе [7] и здесь подробно не рассматриваются. Общая характеристика воздействия взрыва на человека дана в табл. 24.

#### Воздействие избыточного давления на человека

Таблица 2.

Избыточное давление, бар	Уровень поражения человека
5 - 8	Безусловное смертельное поражение
3,5 - 5	Летальный исход в 50% случаев
2 - 3	Порог смертельного поражения
1,3 - 2	Тяжелая степень поражения легких, 50% разрыв барабанных перепонок:
$\leq 2$ 1,3 - 1,5	-возраст до 20 лет -возраст свыше 20 лет

Для определения вероятности летального исхода от прямого воздействия на людей избыточного давления  $P_s$  и импульса  $I_s$  в работе [8] предложена пробит-функция:

$$Pr = -2,44 \cdot \ln(7380/P_s + 1,9 \times 10^9 / (P_s \times I_s)), \quad (4.4)$$

Для случая полного разрушения зданий при газовом взрыве:

$$Pr = -0,22 \ln((40/P_s)^{7,4} + (460/I_s)^{11,3}), \quad (4.5)$$

Размерность  $P_s$  - н/м<sup>2</sup>, а  $I_s$  - н/м<sup>2</sup>с

Следует подчеркнуть, что в случае нахождения людей в момент внешнего взрыва в зданиях, их поражение может наступить от механического воздействия за счет разрушения зданий (обрушения перекрытий и т.п.) уже при давлениях 0,3 - 0,5 бар.

В отечественной технической литературе для определения радиусов зон различной степени разрушения зданий и поражения органов дыхания человека при детонационных взрывах твердых веществ (TNT) используются кривые равновероятного разрушения (поражения) в координатах  $\Delta P$ - $I$ : где  $\Delta P(R)$  - максимальное избыточное давление во фронте ударной волны;  $I(R)$  - импульс фазы сжатия на расстоянии  $R$  от центра облака.

Радиус соответствующих зон поражения определяется решением следующего уравнения:

$$\frac{k}{\Delta P(R) - P^*} = I(R) - I^* \quad (4.6)$$

где  $I^*, P^*$  - асимптотические значения импульса и давления;  $k$  - числовой коэффициент.

Значения этих параметров для кривых разрушения зданий и выживания человека при частичном поражении органов дыхания приведены в таблице 25.

Для описания разрушения стекол достаточно знать лишь значение  $\Delta P$ , т.е. принять, что  $I^*=0$ ,  $k=0$ .

Таблица 25

Характеристика действия ударной волны	$I^*, \text{Па} \cdot \text{с}$	$P^*, \text{Па}$	$k, \text{Па}^2 \cdot \text{с}$
<i>Разрушение зданий</i>			
R1 Полное разрушение зданий	770	70100	886100
R2 Граница области частичного разрушения: 50%-75% стен разрушено или находится на грани разрушения	520	34500	541000
R3 Граница области значительных повреждений: повреждение некоторых конструктивных элементов, несущих нагрузку	300	14600	119200

Характеристика действия ударной волны	$I^*, \text{Па} \cdot \text{с}$	$P^*, \text{Па}$	$k, \text{Па}^2 \cdot \text{с}$
<i>Разрушение зданий</i>			
R4 Граница области минимальных повреждений: разрыв соединений и расчленение конструкций	100	3600	8950
R5 Полное разрушение оконных стекол	0	7000	0
R7 50% разрушение оконных стекол	0	2500	0
R8 Более 10% оконных стекол разрушено	0	2000	0
<i>Выживание человека при поражении органов дыхания</i>			
R9 50% выживания	440	$2,43 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^8$
R10 Порог выживания	100	$6,59 \cdot 10^4$	$1,62 \cdot 10^7$

## Е. Токсическое воздействие газообразных химических веществ на человека.

### 1. Острое токсическое воздействие

Обычно в медицинской литературе для характеристики острого ингаляционного воздействия газообразных токсических веществ приводятся значения концентраций, вызывающих 50% поражение при экспозиции в течение некоторого времени "Т" ( $LD_{50}$ ). Эта характеристика по существу определяет интегральную меру токсиканта, в случае получения которой возможен летальный исход у 50% субъектов в группе. В более общем случае токсическая нагрузка должна вычисляться с учетом изменения концентрации вещества за принятый период времени Т:

$$D = \int_0^T C^n(t) dt \quad (4.7)$$

Здесь  $C(t)$  - функция (динамика изменения) концентрации в той точке пространства, куда помещен субъект, зависящая от относительной (по воздуху) плотности газа, параметра устойчивости атмосферы, скорости ветра, интенсивности и длительности выброса из источника, высоты самого источника относительно земли и целого ряда других факторов;  $n$  - показатель степени, характеризующий механизм воздействия и природу токсиканта.

Как было отмечено выше, в наиболее общем случае относительную вероятность (от 0 до 1) поражения в результате получения субъектом(ами) определенной токсической нагрузки (дозы) представляют в виде аргумента пробит-функции в формуле (4.1).

$$Pr = a + b \times \ln(D)$$

В случае пребывания субъекта в атмосфере с постоянной концентрацией значе- ния пробит-функции можно записать как:

$$Pr = a + b \times \ln(C^n T)$$

Особо отметим практический прием проверки правильности использования кон- стант пробит-функции. Если при подстановке в уравнение для пробит-функции извест- ных констант (a,b,n) и величины  $LD_{50}$  получится значение  $Pr = 5$ , то константы приме- няются для выражения  $P_{пор} = f(Pr-5)$ . Если же  $Pr = 0$ , то - для  $P_{пор} = f(Pr)$ .

Для различных токсичных и вредных веществ пробит-функция имеет различные константы, определяемые в результате специальных медико-биологических исследо- ваний, и отнесенные к среднестатистическому составу населения или, если это ого- ворено специально, к определенному контингенту (группе) людей. В таблице 26 при- ведены константы для вычисления пробит-функции летального поражения для неко- торых химических веществ, рекомендованные Центром изучения безопасности хими- ческих процессов Американского института инженеров-химиков [9] для технического персонала заводов.

**Константы для вычисления "пробит- функции" летального поражения технического персонала (C ppm, T - мин).**

Таблица 26

ВЕЩЕСТВО	$Pr=a+b \times \ln (C^n T)$		
	a	b	n
Акролеин	-9.931	2.049	1
Акрилонитрил	-29.42	3.008	1.43
Аммиак	-35.90	1.85	2
Бензол	-109.78	5.3	2
Бром	-9.04	0.92	2
Угарный газ	-37.98	3.7	1
Четыреххлористый углерод	-6.29	0.408	2.5
Хлор	-8.29	0.92	2
Формальдегид	-12.24	1.3	2
Соляная кислота	-16.85	2.00	1.00
Цианистоводородная кислота	-29.42	3.008	1.43
Фтористоводородная кислота	-35.87	3.354	1.00
Сероводород	-31.42	3.008	1.43
Бромистый метил	-56.81	5.27	1.00
Метилизоцианат	-5.642	1.637	0.653

ВЕЩЕСТВО	$Pr=a+b \times \ln (C^n T)$		
	a	b	n
Двуокись азота	-13.79	1.4	2
Фосген	-19.27	3.686	1
Окись пропилена	-7.415	0.509	2.00
Двуокись серы	-15.67	2.10	1.00
Толуол	-6.794	0.408	2.5

Следует отметить, что результаты токсикологического воздействия могут от- чаться весьма значительно в зависимости от текущего состояния человека, его ве- растных и физических данных и ряда других особенностей. Это приводит к тому, ч- зачастую доля (процент) поражения может изменяться в 2 - 5 раз при поглощен- одной и той же дозы токсиканта. Более того в ряде работ значения пробит-функц- определяются с учетом поведения людей и их физиологической активности [11].

Этап выделения и обоснования критериев негативного токсического воздей- вия на человека во многом определяет получаемые в дальнейшем количественн- характеристики риска. Так, например, распространение критериев токсическо- воздействия, принятых для технического персонала предприятия, на все населен- региона приводит к значительному занижению показателей риска.

Ниже дан пример обоснования критериев негативного воздействия для хлор- приведенный в работах [12,13].

Население, потенциально подверженное токсическому воздействию хлора, (груп- риска) состояло из лиц различных возрастных групп, в том числе здоровых людей- некоторых категорий больных:

Дети	<6 месяцев	0.8%
	<12 месяцев	0.8%
	12 месяцев-6 лет	7.5%
	6 лет-9 лет	8.2%
Пожилые люди	>70 лет	8.5%
Люди с хроническими заболеваниями сердца		0.5%
Люди с заболеваниями органов дыхания		0.9%
Люди с ограниченной подвижностью		0.4%
Слепые		0.2%
Взрослые и подростки		72.2%

При оценках дозы поглощения токсиканта принималось во внимание различие- скорости дыхания человека в зависимости от вида деятельности; типичные значени- этого параметра даны в табл. 27.



**Скорость дыхания и поглощения кислорода  
при различных видах деятельности человека**

Таблица 27

Вид деятельности	Скорость дыхания, л/мин	Скорость поглощения O <sub>2</sub> л/мин
Сон	6	0.240
Отдых: - в положении сидя - в положении стоя	7 8	0.300 0.300
Прогулка, 2 мили/час	14	0.650
Прогулка, 4 мили/час	26	1.2
Лыжная прогулка	43	2.0
Максимальные физичес- кие нагрузки	65-100	3.0-4.0

При оценках масштабов поражения учитывалось также, что наиболее чувствительная группа населения (в данном случае старики и дети) составляла до 30% от всего населения.

На основании этого анализа были предложены следующие зависимости пробит-функций ( $\{Pr-5\}$ ):

для взрослых и подростков -  $Pr = -8.29 + 0.92 \times \ln(C^2 t)$   
 для детей и стариков -  $Pr = -6.61 + 0.92 \times \ln(C^2 t)$

Представив полученные данные в виде графика зависимости доли поражения от концентрации хлора (рис. 46) и сравнив с соответствующими показателями других авторов, можно заключить, что оценки зависимости "доза-поражение" могут различаться в 4-5 раз:

Eisenberg и др. [14] -  $Pr = -17.1 + 1.69 \times \ln(C^{2.75} t)$   
 Perry и Articola [15] -  $Pr = -36.45 + 3.13 \times \ln(C^{2.64} t)$   
 Rijnmond Report [16,17] -  $Pr = -11.4 + 0.82 \times \ln(C^{2.75} t)$   
 ten Berge [18] -  $Pr = -5.04 + 0.5 \times \ln(C^{2.75} t)$

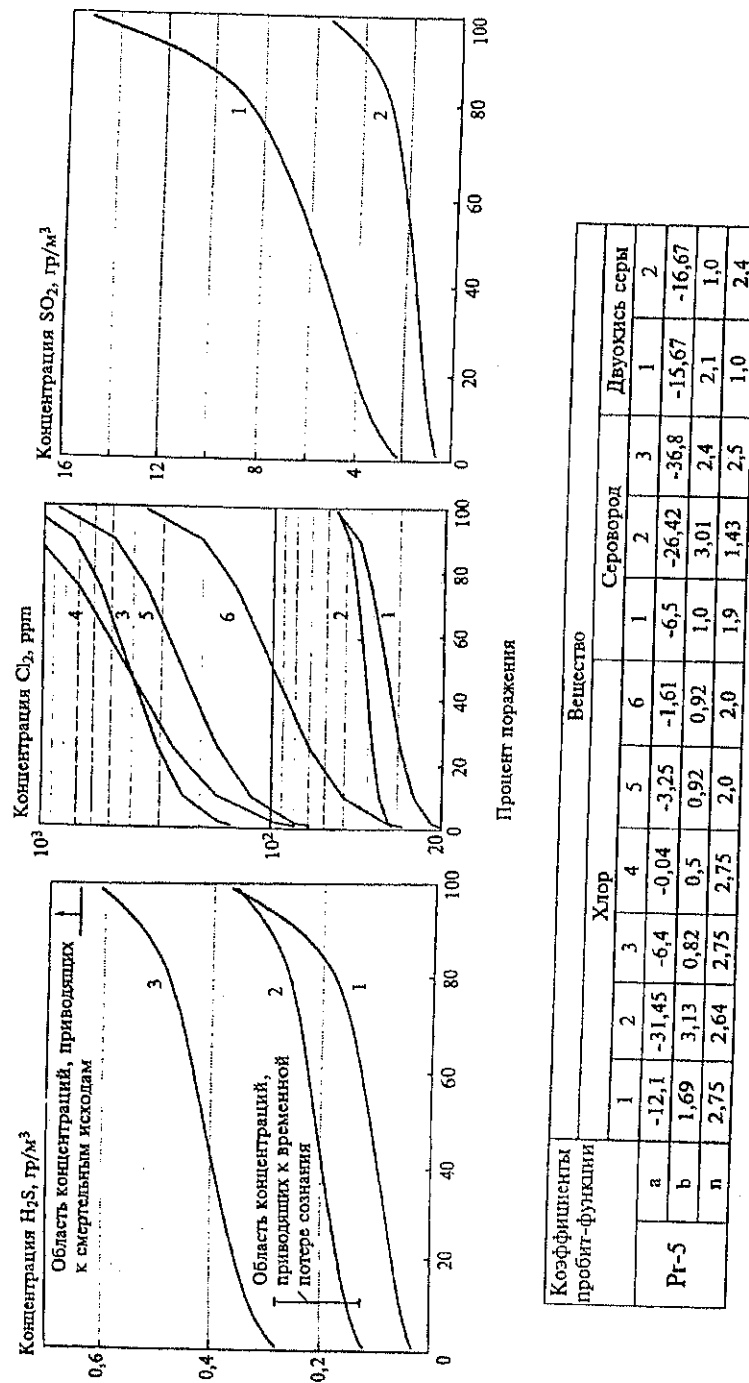
Аналогичный анализ был проведен нами для оценки поражения людей сероводородом и сернистым ангидридом.

На рис.46 представлены результаты обобщения данных работ [8,9,10, 11] по пробит-функциям для H<sub>2</sub>S. При этом параметр "а" корректировался по некоторым отечественным нормативам или ведомственным документам.

В качестве комментария к рис. 46 отметим, что по данным Н.Лазарева<sup>\*)</sup> потеря сознания при вдыхании сероводорода может наступить уже при концентрациях токсиканта 140-285 мг/м<sup>3</sup>, а при концентрациях > 650-700 мг/м<sup>3</sup> смертельный исход наступает при экспозиции > 30 мин. По данным одной из инструкций ГАЗПРОМ<sup>\*\*)</sup>

<sup>\*)</sup> Лазарев Н.В. "Вредные вещества в промышленности" Справочник, т.3.Л."химия", 1997с

<sup>\*\*)</sup> И-72. Инструкция по безопасности работ при разработке нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений, содержащих сероводород. М.,1977г, Приложение1, стр.19



**Рис. 46.** Варианты зависимости процента поражения людей от токсической нагрузки (при 30 мин. экспозиции)

смертельный исход от поражения сероводородом может наступить при концентрации 750 мг/м<sup>3</sup> при экспозиции 15-20 мин. По данным ВНИИГАЗ<sup>а</sup> токсодоза, приводящая к смертельному исходу, составляет 600-840 мг/м<sup>3</sup> при экспозиции 40-60 мин.

Характеристика токсических эффектов для SO<sub>2</sub> изучена в меньшей степени, чем для сероводорода, что объясняется его меньшей токсичностью и распространенностью. Так зарубежными исследователями приводятся значения концентрации для 50% поражения при экспозиции 30 мин - 5784 мг/м<sup>3</sup> [8], что соответствует первому варианту параметров пробит-функции на рис. 46. По данным ВНИИГАЗ<sup>а</sup> смертельный исход от отравления SO<sub>2</sub> может наступить при экспозиции 30-60 минут уже при концентрациях 1400-1700 мг/м<sup>3</sup>. Этим данным соответствует второй набор параметров пробит-функции. По данным Н.Лазарева человек может выдержать без патологических последствий в течение 1 мин концентрацию SO<sub>2</sub> на уровне 300 мг/м<sup>3</sup>.

Обобщая изложенное выше, можно рекомендовать следующий подход к оценке токсического действия газообразных химических веществ на человека: при неопределенности в значениях пробит-функции следует принимать такие критерии негативного воздействия, которые вызывают поражение у наиболее уязвимой части населения (во всех примерах на рис. 46 это нижние кривые пробит-функций).

## 2. Длительное воздействие токсических веществ \*\*

Проблема длительного (хронического) воздействия малых концентраций вредных веществ на человека является на сегодня одной из наиболее сложных, поскольку экспериментальное определение статистически значимой зависимости "доза - эффект" в этом случае представляет серьезные трудности. Как правило, негативные последствия токсического поражения определяются путем продолжительного сравнительного медико-биологического изучения большого количества людей, проживающих на загрязненной и "чистой" территории.

В качестве характерного примера ниже приведены некоторые результаты медико-биологических исследований по воздействию на человека смога и его наиболее значимых компонентов - пероксинитратов, а также смеси пероксинитратов с озоном и окислами типа NO<sub>x</sub>.

Установлено, что уже в концентрации 1·10<sup>-6</sup> пероксинитраты вызывают раздражение слизистой оболочки глаз [19]. Обнаружена их значительная мутагенная активность и сделано предположение, что пероксинитраты являются этиологическими агентами, увеличивающими число заболеваний раком кожи [20]. В экспериментах показано, что при действии на живой организм смеси пероксинитратов с озоном и окислами азота в концентрации выше 0,25·10<sup>-6</sup> у людей начинается кашель, головная боль, могут возникнуть приступы астмы [21-23]. В таблице 28 приведены результаты исследований заболеваемости населения, полученные путем длительного сравнительного изучения последствий воздействия смога на большие группы людей. Установлено, что при прочих равных условиях в крупных промышленных, экологически неблагополучных городах (условно "загрязненная" область) значительно возрастает число различных видов заболеваний [24].

<sup>а</sup>) Босняцкий Г.П., Гриценко А.И., Седых А.Д. Проблемы экологического мониторинга в газовой промышленности, М., АО НИКА-5, 1993г, 85с.

<sup>б</sup>) Раздел подготовлен совместно с В.В. Меньшиковым

Число пациентов и виды заболеваний в течение  
смогового периода и контрольного периода в  
загрязненной и контрольной областях

Таблица

Диагноз		Загрязненная область		Контрольная область	
		Смоговой период	Контрольный период	Смоговой период	Контрольный период
Сердечно-сосудистые болезни	С	115.3	108.8	109.7	101.8
	Г	87.6	73.7	56.1	53.5
	А	35.1	28.4		
	К	12262	12539	2648	2730
Сердечная недостаточность	С	22.1	18.5	24.1	21.0
	Г	41.3	36.2	26.2	22.1
Коронарная недостаточность	Г	24.0	18.4	11.2	10.9
Аритмия сердца	Г	7.6	5.1	4.7	5.1
Сердечный инфаркт	С	22.1	20.3	20.9	21.2
	Г	18.6	16.9	11.7	11.5
Гипертония	Г	4.6	4.1	3.1	3.2
Респираторные болезни	С	19.3	18.9	16.9	17.6
	Г	50.7	47.3	36.0	35.9
	А	13.6	10.0		
	К	9706	9780	2258	2347
Пневмония	Г	10.3	10.5	6.7	7.3
Бронхит хронический	С	4.6	4.1	3.4	3.7
	Г	5.7	4.1	7.0	6.6
Рак легкого	С	11.3	9.4	6.0	6.1
Респираторные осложнения сердечно-сосудистыми болезнями	С	11.7	10.7	9.7	9.5
	Г	6.4	5.8	6.3	5.2
	А	3.6	3.2		
	К	4048	4062	941	961

где С- смертность (сравнение смогового периода со всеми периодами наблюдения), Г- случаи госпитализации, А- амбулаторное лечение, К- случаи консультации.

Вместе с тем для проведения количественного анализа риска необходимы не только косвенные оценки негативных последствий токсического поражения человека, как это представлено, например, в табл. 28; не менее важно знать количественную зависимость между этими последствиями и поглощенной дозой конкретного токсиканта. Наиболее изучена такая зависимость для канцерогенных веществ. Эти вещества, способствующие возникновению раковых заболеваний, отличаются от прочих токсикантов так называемым кумулятивным действием (накоплением в организме и

суммированием биологического действия). Для расчета зависимости "доза-эффект" в отношении допустимого содержания канцерогенов в воздушной среде имеется соответствующая методика, на примере которой могут быть показаны последовательные этапы определения уровня воздействия токсиканта. Согласно этой "Методике определения аэрогенной нагрузки канцерогенов на население", утвержденной Минздравом СССР в 1984 г. [25], принимается, что основной путь попадания канцерогенов из различных опасных источников окружающей среды в организм человека связан с его органами дыхания. Далее в качестве аэрогенной дозы конкретного канцерогена рассматривают такую его дозу, которая отражает суммарное воздействие токсиканта на население (или его отдельные контингенты в определенных местах пребывания) на протяжении естественного периода жизни с учетом среднегодовой концентрации и динамики изменения дозы во времени.

Исходными параметрами для определения дозы канцерогена, поступающего в организм человека с воздушными загрязнениями в течение годового цикла, должны быть среднегодовые концентрации его в атмосферном воздухе и воздушной среде рабочей зоны, как наиболее объективно отражающие уровень содержания токсиканта в соответствующих средах за длительный период времени.

Наряду со среднегодовыми концентрациями канцерогенов определяются усредненные доли годового периода, в течение которых среднестатистический человек пребывает в пяти условно обозначенных зонах: во внутрижилищном помещении ( $T_{вж}$ ), в жилой зоне ( $T_{жз}$ ), рабочей зоне ( $T_{рз}$ ), зоне транспортных магистралей ( $T_{тр}$ ), в зоне рекреаций ( $T_{з}$ ).

Тогда годовое время ( $T$ ), равное 8760 часам и принятое за 100%, может быть определено по формуле:

$$T = T_{вж} + T_{жз} + T_{рз} + T_{тр} + T_{з} =$$

$$= 100/8760 [n_{вж} N_{вж} + n_{жз} N_{жз} + n_{рз} N_{рз} + n_{тр} N_{тр} + n_{з} N_{з}]$$

где  $n_{вж}$ ,  $n_{жз}$ ,  $n_{рз}$ ,  $n_{тр}$ ,  $n_{з}$  - количество часов в сутки, в течение которых человек пребывает в условиях внутрижилищных помещений, жилой, рабочей (производственной) зоны, зоны транспортных магистралей и зоны рекреации соответственно;  $N_{вж}$ ,  $N_{жз}$ ,  $N_{рз}$ ,  $N_{тр}$ ,  $N_{з}$  - количество дней в году, в течение которых человек находится в условиях обозначенных зон.

Сведения о распределении годового времени по различным видам производственной и бытовой деятельности человека могут быть получены из литературных источников и специально проведенных хронометражных исследований.

Возвращаясь к вопросу об определении допустимой величины среднегодовой концентрации канцерогена (других токсикантов), следует отметить, что оценка его содержания в приземном слое атмосферы связана прежде всего с идентификацией всех (промышленных и бытовых) опасных источников токсикогенеза; далее должны быть обоснованы соответствующие методики расчета рассеивания выбросов с учетом метеорологической специфики региона (повторяемости, силы и направлений ветра, классов устойчивости атмосферы в годовом разрезе), а также с учетом материального баланса предприятий и конкретных технологических особенностей производства.

Важным аспектом при решении поставленной задачи является учет возможных физико-химических превращений выбрасываемых веществ в атмосфере, особенно в случае штилевых ситуаций, благоприятных для токсического поражения. При штиле

концентрация вредных веществ вблизи их источника может повыситься более, чем два порядка по сравнению с ветровыми условиями. Кроме того, фотохимические реакции попавших в атмосферу веществ, могут привести в ряде случаев к превращению нетоксичных соединений в токсичные, (например, углеводородов в пероксиак нитраты и озон), а применительно к высокотоксичным соединениям, наоборот, звать их превращение в менее токсичные. Этот факт может в значительной мере влиять на результаты оценки риска.

На основании рассчитанной указанным путем дозовой нагрузки можно дать определить, в частности, риск различных заболеваний населения. Такая методика используется, например, агентством ЕПА в США.

### 3. Подходы к нахождению зависимости "доза-эффект"

Построение модели "доза-эффект" является на сегодня наиболее сложным наименее изученным элементом задачи количественной оценки риска. Это обусловлено, во-первых, многообразием веществ, поступающих в организм человека различными путями: через дыхание, кожу, вместе с водой, пищей и т.д.; во-вторых, различными механизмами поведения веществ в организме (вещества распадаются, накапливаются, трансформируются, индуцируют патологические изменения, снижают иммунитет и т.д.). Кроме того, изучение последствий влияния того или иного агента воздействия, как правило, происходит на фоне параллельно протекающих процессов, неподдающихся достоверной оценке. Поэтому модели "доза-эффект" достаточно хорошо разработаны только для двух типов воздействий: острый тип воздействий (острая токсичность), при котором опасный фактор доминирует над остальными (например, в случае острых отравлений, токсикологических аварий); и хронический тип воздействия (хроническая токсичность) когда воздействие носит характер постепенного устойчивого, статистически подтверждаемого разрушения организма (например, в случае длительного воздействия малых доз радиации).

Ясно, что адекватная целям исследований риска модель количественной оценки токсического поражения человека будет достаточно сложной, поскольку должна удовлетворять целому ряду требований:

- 1) количественная оценка риска должна быть интегральной, т.е. включать сумму факторов негативного воздействия с учетом их взаимосвязи;
  - 2) она должна быть вероятностной, поскольку невозможно точно определить время проявления тех или иных сочетаний опасных факторов в совокупности с предрасположенностью организма к тем или иным воздействиям;
  - 3) модель должна вместе с тем обеспечивать непрерывность оценки риска, т.е. адекватно отражать реакции на промежуточный уровень негативного воздействия.
- Перечисленные выше требования не сопоставимы с возможностями отечественной методологической базы количественных оценок токсического поражения. Так и сегодня имеются шкала предельно допустимых концентраций вредных веществ (для малых доз) и шкала летальных доз (для случаев острых воздействий). В научных публикациях обсуждаются такие понятия как "пороговость" и "беспороговость" воздействия, экстраполяция от высоких доз воздействия к низким, возможность перенесения закономерностей "доза-эффект", полученных на животных, для расчетов рисков эффектов воздействия на человека [26] и ряд других.

Вместе с тем зарубежом имеется достаточно большой набор моделей для описания функции "доза-эффект". К наиболее часто применяемым из них относятся:

- модель распределения толерантности для острых токсических доз неканцерогенных веществ [27,28], во многом аналогичная пробит-функции;  
 - модификация Манта-Браена для пробит-модели [29,30] как метод определения безопасной дозы для канцерогенов.  
 - "ударные" модели, основанные на многофакторности процесса канцерогенеза [31,32,33].

- полиномиальные модели [34,35]

В целом ряде работ [36] для определения последствий длительного воздействия малых доз вредных веществ на человека используют линейные модели вида:

$$P_{\text{пор}}(D,t) = k_c \times C$$

где  $k_c$  - коэффициент дозовой зависимости для определенного вида ущерба за период всей жизни человека в данном районе, а  $C$  - средняя величина концентрации вредного вещества за годовой период ( $\text{мг}/\text{м}^3 \cdot \text{год}$ ).

Эти модели строятся на основании медицинских данных о смертности и заболеваемости и, как правило, достаточно точно отражают последствия воздействия малых доз токсиканта на человека за продолжительный период времени. Указанный подход наиболее удобен для рассмотрения задачи прогнозирования экологического ущерба при систематических выбросах вредных веществ в регионе. Для реализации этого подхода необходимы соответствующие статистические данные. В таблице 29 представлены, например, данные канцерогенной активности по некоторым классам вредных веществ.

Оценка относительной канцерогенной активности,  $k_c$

Таблица 29

Классы веществ	Потенциальная активность		
	(доля случаев)/(время жизни · мг/кг)		
	средневзвеш. оценка (а)	пределы величин (б)	(а) / (б)
летучие О и S гетероциклы	$3.1 \times 10^{-7}$	$0-6.0 \times 10^{-7}$	1.9
летучие N гетероциклы	$2.3 \times 10^{-3}$	$0-1.2 \times 10^{-1}$	52.0
полициклические ароматические углеводороды	$1.4 \times 10^{-3}$	$0-1.1 \times 10^{-1}$	79.0
ароматические амины	$1.2 \times 10^{-5}$	$0-1.7 \times 10^{-4}$	14.0
нейтральные N,S,O гетероциклы	$3.0 \times 10^{-3}$	$0-6.0 \times 10^{-3}$	2.0
нитрилы	$1.3 \times 10^{-4}$	$0-3.1 \times 10^{-4}$	2.4
мышьяк	$6.8 \times 10^{-6}$	$0-1.0 \times 10^{-3}$	150.0
никель	$2.8 \times 10^{-5}$	$0-5.1 \times 10^{-2}$	1800.0

При необходимости перехода от расчетов по дозовой зависимости к расчетам по концентрационной зависимости принимают, что:

а) данные по дозовой зависимости характеризуют воздействие за 1 год;  
 б) средний вес человека составляет 60-70 кг;  
 в) объем вдыхаемого воздуха равен  $7300 \text{ м}^3/\text{год}$ .  
 Тогда для годового периода:

$$k_b = k_c \times 7300/60$$

Как было отмечено выше, в литературе приведено сравнительно мало новых данных для оценки воздействия на здоровье человека малых доз различных химических веществ. Два примера из их числа, касающиеся зависимости "доза-эффект" для двуокиси серы и сульфатов-двух наиболее распространенных серосодержащих загрязнителей атмосферы-представлены в таблице 30. В ней летальные иды (или заболеваемость) измерены как  $10^{-6}$  смертей (или случаев болезни) на м за один человеко-год.

Таблица 30

Исход	Загрязнитель	
	Двуокись серы	Сульфаты
смерть:		
мужчины в возрасте, лет		
18-44	0,5	20 [20]
45-64	20 [15]	500 [100]
женщины в возрасте, лет		
18-44	1 [0,6]	11 [3]
45-64	20 [12]	320 [40]
заболевания:		
бронхит	-9 [60]	4470 [2500]
круп	750 [100]	792 [600]
пневмония	13 [50]	500 [1000]

Числа в скобках представляют стандартные ошибки коэффициентов.

Согласно методу, изложенному в работе [26], для нахождения зависимости "доза-эффект" используется понятие относительного потенциала (RP) вредного вещества. Эту величину рассчитывают двумя способами. По первому берут стандартное химическое вещество, которое в дозе  $D_x$  вызывает определенное воздействие на человека. Затем берут исследуемое вещество и подбирают его дозу  $D_y$  таким образом, чтобы в результате достигалось то же самое воздействие на человека, что и эталона. Тогда

$$RP = \frac{D_x}{D_y}$$

По второму способу берут эталон и исследуемое вещество в одинаковых концентрациях и устанавливают время, в течение которого достигается один и тот же эффект (воздействие). В этом случае

$$PR = \frac{T_x}{T_y}$$

Затем с помощью относительного потенциала могут быть определены математические аналоги функции "доза-отклик". Например, для стандартного химического вещества бензопирен известна функция риска от дозы

$$R = f(D),$$

а для изучаемого вещества эта функция неизвестна, но из биологических тестов установлен относительный потенциал (RP). Тогда риск от изучаемого элемента может быть определен согласно выражению:

$$R = f(RP \times D)$$

Как было отмечено ранее, в соответствии с американской методикой ЕПА для вычисления риска может быть использована так называемая линейная модель "отклика". При этом применяемый в модели коэффициент "отклика"  $\beta$  — [его размерность (кг веса) × (день) / (мг вещества)] характеризует вероятность возникновения определенной болезни (например, рака) при постоянной среднесуточной дозе канцерогена или при поступлении вредных веществ с водой или пищей в течение всей жизни. Тогда величина риска (R) (или вероятность возникновения болезни) в течение жизни при ингаляционном поступлении вредного вещества с концентрацией "с" может быть вычислена по формуле:

$$R = \frac{V}{T_x} \cdot k \cdot \beta \cdot c \cdot 10^{-3},$$

где:

$T_x$  — время жизни человека

$V$  — объем дыхания одного человека в день, принятый как 22,8 м<sup>3</sup>

$k$  — коэффициент сорбции вещества организмом, принятый в диапазоне 0,5-1

$c$  — концентрация вредного вещества во вдыхаемом воздухе мкг/м<sup>3</sup>

При подстановке постоянных величин получим:

$$R = \frac{22,8 \cdot 10^{-3} \times (0,5 \dots 1) \times c \times \beta}{70} = (1,6 \dots 3,2) \cdot 10^{-4} \times c \times \beta$$

В таблице 31 приведены эмпирические значения коэффициентов "отклика"  $\beta$  для различных веществ при том, что время жизни "среднестатистического" человека принято равным 70 годам [37]. Указанные величины  $\beta$  могут быть использованы для оценки риска последствий канцерогенеза.

# Коэффициенты "отклика" канцерогенного риска для паров органических веществ.

Таблица

Вещество	$\beta$ , кг/день мг	Вещество	$\beta$ , кг/день мг
п-Гексан	$2.6 \times 10^{-5}$	Триметилбензол	
п-Гептан	$3.1 \times 10^{-5}$	1,2,3-изомер	$1.1 \times 10^{-3}$
п-Октан	$3.1 \times 10^{-5}$	1,2,4-изомер	$4.6 \times 10^{-4}$
п-Нонан	$3.1 \times 10^{-5}$	1,3,5-изомер	$4.6 \times 10^{-4}$
п-Декан	$3.1 \times 10^{-5}$	п-Бутилбензол	$3.8 \times 10^{-4}$
п-Ундекан	$3.1 \times 10^{-5}$	п-Метил-изопропилбензол	$7.5 \times 10^{-4}$
п-Додекан	$3.1 \times 10^{-5}$		
п-Тридекан	$3.1 \times 10^{-5}$	Нафталин	$1.2 \times 10^{-3}$
п-Тетрадекан	$3.1 \times 10^{-5}$	1-Метилнафталин	$2.7 \times 10^{-4}$
п-Пентадекан	$3.1 \times 10^{-5}$	Тетрахлорметан	$6.1 \times 10^{-3}$
п-Гексадекан	$1.1 \times 10^{-5}$	Трихлорэтилен	$1.7 \times 10^{-3}$
3-Метилпентан	$4.6 \times 10^{-4}$	Тетрахлорэтилен	$9.2 \times 10^{-3}$
2-Метилгексан	$4.6 \times 10^{-4}$	Хлорбензол	$1.4 \times 10^{-3}$
3-Метилгексан	$4.6 \times 10^{-4}$	о-Дихлорбензол	$7.6 \times 10^{-4}$
Циклогексан	$4.6 \times 10^{-5}$	м-Дихлорбензол	2.6
Метилциклогексан	$4.6 \times 10^{-5}$	п-Дихлорбензол	$6.7 \times 10^{-4}$
Диметилциклопентан		Трихлорбензол	
изомер 1,1	$7.1 \times 10^{-5}$	1,2,3-изомер	$3.5 \times 10^{-3}$
изомер 1,2	$7.1 \times 10^{-5}$	1,2,4-изомер	$3.5 \times 10^{-3}$
изомер 1,3	$7.1 \times 10^{-5}$	1,3,5-изомер	$3.5 \times 10^{-3}$
Лимонен	$2.3 \times 10^{-4}$	Хлороформ	$1.4 \times 10^{-2}$
Бензол	$1.0 \times 10^{-3}$	1,2-Дихлорэтан	$1.3 \times 10^{-1}$
Толуол	$9.0 \times 10^{-4}$	1,2-Дихлорэтан	$1.3 \times 10^{-1}$
Ксилол	$9.9 \times 10^{-4}$	1,1,1-Трихлорэтан	$1.7 \times 10^{-5}$
Этилбензол	$3.4 \times 10^{-4}$	Стирол	$1.9 \times 10^{-3}$
п-Пропилбензол	$2.0 \times 10^{-4}$	1,4-диоксан	$5.5 \times 10^{-3}$
Изопропилбензол	$5.5 \times 10^{-4}$	а-Пинен	$3.6 \times 10^{-4}$
о-Метилэтилбензол	$7.5 \times 10^{-4}$	Радон (Cl/литр)	$1.5 \times 10^{-4} / WLM$
м-Метилэтилбензол	$7.5 \times 10^{-4}$	Формальдегид	$1.1 \times 10^{-1}$
п-Метилэтилбензол	$3.2 \times 10^{-4}$	Табачный дым	0.3

WLM — количество рабочих месяцев (= 0.225 года)

Осредненные показатели загрязнения региона токсикантами в разрезе года на сегодня определяются в основном по данным мониторинга. Это связано с большими сложностями математического прогнозирования процессов турбулентного переноса веществ в атмосфере, с широким спектром фотохимических реакций в атмосфере, неоднозначными процессами "вымывания" вредных веществ с влажными и сухими осадками и рядом других факторов.

Перейдем далее к рассмотрению критериев негативного воздействия на окружающую среду предприятий газовой отрасли.\*)

Их эксплуатация в нормальном технологическом режиме сопряжена с плановыми (постоянными или периодическими) выбросами загрязняющих веществ в атмосферу и сбросами в водоемы и на рельеф. Кроме того, имеют место аварийные (нештатные) ситуации. В отличие от единых подходов в измерении аварийного риска, при анализе экологического риска требуется обоснование множественных критериев негативного воздействия предприятий на различные элементы экосистемы с учетом сложных и долговременных взаимосвязей между ними. Эта задача отличается крайней сложностью и на современном уровне знаний не всегда имеет однозначное решение.

Качественно проблему экологического риска можно свести к двум ее основным аспектам:

1 - Определение качественного и количественного состава и динамики поступления вредных веществ, выбрасываемых предприятием в атмосферу или иную природную среду в разрезе года, а также специфику их дальнейших физико-химических трансформаций и конечные продукты этих превращений.

2 - Установление критериев устойчивости ландшафтов и критических нагрузок на отдельные компоненты природной среды и экосистемы в целом с учетом уже имеющегося фоновое состояние.

По масштабам и специфике систематического негативного влияния на экосистемы объекты газовой отрасли могут быть условно распределены следующим образом:

1. Газоперерабатывающие комплексы, характеризующиеся выбросами в атмосферу больших масс серосодержащих веществ, окислов азота, окиси углерода, полициклических ароматических углеводородов, легких углеводородов и др. вредных веществ.

2. Линейные и многоцеховые газоперекачивающие станции, выбрасывающие в атмосферу с продуктами сгорания природного газа окислы азота и углерода.

3. Подземные газовые хранилища, являющиеся источниками выделений в атмосферу природного газа, а также загрязнения подземных и поверхностных вод и геологического разреза метанолом и нефтепродуктами.

4. Буровые скважины как источники выбросов в атмосферу продуктов сгорания топлива на дизельных установках, а также жидких и твердых отходов бурения органического и неорганического происхождения.

5. Магистральные трубопроводы как объекты, нарушающие почвенный и растительный покров, гидрологический и мерзлотный режимы, особенно на стадии строительства, а также способные привести к пожарам лесных массивов и посевов в полосе прохождения трассы.

Наиболее сложным представляется вопрос о достоверном определении адаптационных характеристик экосистем.

\*) Раздел подготовлен совместно с Л.Н. Морозовой, Ю.П. Сотсковым

Как известно, существующая система санитарных норм (ПДК) призвана защитить в первую очередь здоровье человека. В то же время экосистемы ко многим загрязняющим веществам оказываются более чувствительными, чем человек. Руководствоваться при принятии решений нормативами ПДК, значит обречь эти экосистемы на постепенное уничтожение. В связи с этим предельные количества вредных веществ, поступающих в экосистемы, должны оцениваться только на основе специальных экологических нормативов. Под понятием "экологический норматив" подразумевается мера воздействия на экосистему, при которой ее функциональные характеристики не выходят за пределы естественных колебаний.

Естественно, что экологические нормативы должны не только учитывать специфику загрязнителей, но и иметь региональный смысл, то есть изменяться в зависимости от природно-климатических, а следовательно и ландшафтно-геохимических условий.

В связи с тем, что основной путь поступления и, как правило, наибольшие масштабы распространения загрязняющих веществ от наиболее экологически опасных производств - это атмосферные выбросы, а среди последних по массе и токсичности выделяются соединения азота и серы, рассмотрим их воздействие на сухопутные экосистемы.

Загрязнение атмосферного воздуха может воздействовать на экосистемы двумя способами:

- непосредственно, меняя ассимиляционные функции растений, физико-химические свойства почв и т.д.;

- косвенным образом, "запуская" механизм долгосрочных изменений экосистем под влиянием уже измененного состояния одного или нескольких их компонентов.

При оценке интегрального воздействия на растительность используются пороговые нагрузки по воздействию отдельных загрязняющих веществ на различные виды растений.

Среднегодовыми приземными концентрациями, не приводящими к видимым последствиям для растительного покрова в течение года, можно считать:

для окислов азота - 3-5 мкг/м<sup>3</sup>,  
для SO<sub>2</sub> - 15-20 мкг/м<sup>3</sup>.

При оценке воздействия на почвы опираются прежде всего на изменения их так называемых "буферных свойств".

Поступающие в атмосферу соединения азота и серы после трансформации в виде "сухого" и "мокрого" выпадения в первую очередь изменяют кислотность почвы (pH). Суть этого процесса сводится к постепенному увеличению кислотности почвы и, как следствие, значительному возрастанию (при pH<4-5) скорости перехода в водорастворимое состояние содержащихся в почве в естественном состоянии химических соединений (в виде окислов, силикатов и т.п.) различных металлов, в том числе так называемых "тяжелых", имеющих выраженное токсическое воздействие на человека через "пищевые цепочки". Как показывает анализ, при сильном закислении почвы повышенная токсичность растений с точки зрения содержания "тяжелых" металлов (цинк, свинец, кадмий и т.п.) проявляется уже в течение первого десятилетия с момента ввода технологического объекта эксплуатацию.

Классификация буферных характеристик почв по показателю закисления (интенсивность кислых осадков) дана в таблицах 32,33 [38].

# БУФЕРНЫЕ ЗОНЫ ПОЧВЫ

Таблица 32

Буферная зона	Диапазон значений рН	Процесс, обеспечивающий появление буферности
Карбонатная	$6,2 < \text{pH} < 8,6$	Переход карбонатов в бикарбонаты с высвобождением в почвенный раствор ионов кальция
Силикатная	$5,0 < \text{pH} < 6,2$	"Выветривание" силикатов с высвобождением в почвенный раствор катионов I-III групп
Катионообменная	$4,2 < \text{pH} < 5,0$	Внедрение кислых катионов в почвенный поглощающий комплекс (ППК) с вытеснением в почвенный раствор обменных оснований
Алюминиевая	$3,0 < \text{pH} < 4,2$	Растворение алюмосодержащих минералов с высвобождением в почвенный раствор мономерного Al
Железная	$2,5 < \text{pH} < 3,0$	Растворение полуторных окислов с образованием ионов Fe

# СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ПОЧВ ПО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ДЕЙСТВИЮ КИСЛОТНЫХ ВЫПАДЕНИЙ

Таблица 33

Степень чувствительности почвы		
Чувствительные	Слабочувствительные	Нечувствительные
Умеренно-кислые ( $4 < \text{pH} < 6$ ) малобуферные	—	Нейтральные с $\text{pH} > 6$ и сильнокислые с $\text{pH} < 4$ (автор: * Bache B.W. 1980)
с ЕКО $< 6,2$ мг-экв./100 г в слое 0-25 см	с ЕКО 6,2-15,4 мг-экв./100 г в слое 0-25 см	с ЕКО $< 15,4$ мг-экв./100 г в слое 0-25 см (автор: * McFee W.W. 1983)
Некарбонатные песчаные с рН около 6	Некарбонатные глинистые с рН 6, окультуренные с рН, кислые с $\text{pH} < 5$	Карбонатные (автор: * Wilkander L., 1979)
Умеренно-кислые песчаные и опесчаненные с содержанием гумуса 200 т/га	Умеренно-кислые легко суглинистые на лессах с содержанием гумуса менее 200 т/га	(автор: * Varallyay G et al., 1989)
	Умеренно-кислые суглинистые и глинистые с содержанием гумуса более 200 т/га	

\*ссылки даны по работе [38]

Помимо указанных факторов при закислении почв ухудшаются их биологические свойства, меняется режим гумификации растительных остатков. Характер изменения функциональных свойств почв под действием закисления обобщены в та

# ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ПОЧВЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КИСЛОТНЫХ ОСАДКОВ

Таблиц

Комплекс почвенных свойств	Характер изменений	Наличие изменения по разным литературным источникам
Кисотно-основные почвы	Снижение рН, увеличение обменной и гидрологической кислотности, повышение роли Al в структуре обменных катионов ППК	+ +
Катионообменные свойства почвы	Выщелачивание Ca, Mg, K из ППК, снижение степени насыщенности ППК основаниями	+ +
Содержание и качество гумуса	Снижение скорости деструкции растительных остатков, торможение процессов минерализации гумуса, повышение подвижности фульво-кислот и агрегация гуминовых кислот, уменьшение водорастворимых органических соединений, изменение элементарного состава гуминовых кислот.	+
Формы соединений железа и алюминия	Аккумуляция подвижных форм, соединение металлов в верхних горизонтах профиля, увеличение доли аморфных соединений за счет трансформации несиликатных окристаллизованных и силикатных форм	
Содержание и подвижность микроэлементов	Мобилизация в почвенный раствор Mn, Zn, Cd, Ni, уменьшение подвижности Mo и Cr, уменьшение подвижности Pb и Cu при умеренных кислотных нагрузках и мобилизация их при повышении кислотности	+ +
Микробиоценоз и биохимические свойства почвы	Снижение общей численности бактерий и актиномицетов, рост численности микроскопических грибов, снижение интенсивности дыхания почвы, изменение закономерностей биохимического цикла азота.	+ +

Рассмотренные выше "буферные" свойства почв являются одним из важнейших показателей их долговременной устойчивости к кислотным осадкам. Вследствие этого при прогнозировании воздействия технологических объектов на почвы должны определяться не только масштабы нагрузки (плотность сухого и мокрого осаждения, выраженная в г-экв. катионов водорода на м<sup>2</sup> поверхности земли), но и динамика изменения буферных свойств почв в течение длительного периода воздействия.

В качестве рекомендаций для оценки последствий загрязнения в табл. 35, 36 даны критические нагрузки, предлагаемые Всемирной организацией здравоохранения ВУР/ICP/СЕН 230/В, 0495 для различных типов почв в зависимости от рН исходного почвообразующего материала и его текстуры.

#### Среднегодовые выпадения азотных соединений на единицу площади для различных экосистем

Таблица 35

Экосистема	Нагрузка осадков в пересчете на NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> г/м <sup>2</sup>	Индикаторы видимых последствий
Озера с мягкой водой	2,5 - 5	Уменьшение изоэтидных видов
Мезотропные болота	10 - 18	Увеличение злаковых видов, уменьшение разнообразия
Олиготропные болота (верховые)	2,5 - 5	Уменьшение фаговых и субординатных видов, увеличение злаковых видов
Карбонатные почвы (луга, угодья)	7 - 13	Увеличение разнотравья, уменьшение разнообразия
Нейтральные почвы	10 - 15	Увеличение разнотравья, уменьшение разнообразия
Горные субальпийские луга	5 - 8	Увеличение злаковых видов, уменьшение разнообразия
Низменная сухая пойма	7 - 10	Переход от кустарников к разнотравью
Низменная влажная пойма	8 - 11	Переход от кустарников к разнотравью
Кустарниково-моховая пойма (кислая почва)	3,5 - 10	Уменьшение чувствительных видов
Арктические и горные пустоши	2,5 - 7	Уменьшение мхов, лишайников, карликовая растительность, увеличение разнотравья
Хвойные леса (кислые почвы)	5 - 7	Разбаланс питания у деревьев (низкая скорость нитрификации)
Хвойные леса (кислые почвы)	10 - 25	Разбаланс питания у деревьев (высокая скорость нитрификации)

Экосистема	Нагрузка осадков в пересчете на NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> г/м <sup>2</sup>	Индикаторы видимых последствий
Хвойные леса (кислые почвы)	7 - 10	Изменения в растительности нижнего яруса
Смешанные леса (кислые почвы)	7 - 10	Разбаланс питания у деревьев (высокая скорость нитрификации)
Смешанные леса (кислые почвы)	7 - 10	Изменения в растительности нижнего яруса
Леса (карбонатные почвы)	7 - 10	Изменения в растительности нижнего яруса

#### Критические нагрузки на различные типы почв

Таблица

Критическая нагрузка грамм HNO <sub>3</sub> /м <sup>2</sup> /на год	Исходный почвообразующий материал	Текстура почвы
<1,5	кислый	грубая
1,5 - 3	кислый нейтральный основной	среднегрубая грубая грубая
3 - 6	кислый нейтральный основной	средняя, среднетонкая среднегрубая, средняя среднегрубая
6 - 9	нейтральный основной	средняя, среднетонкая средняя
более 10	нейтральный основной	тонкая среднетонкая

#### Примечание:

к кислым почвообразующим материалам относятся: кварцевый песок, гравий, гранит, гнейсы породы и др.; к нейтральным - изверженные и морские отложения, кронодиалит, лесс к основным - габбро, базальт, доломит, вулканические осадки.

Приведенные данные не только не исчерпывают перечень почвообразующих пород, распространенных на территории, где действуют объекты газовой отрасли, но не учитывают также климатическую зональность процессов почвообразования, следовательно и зональность геохимических процессов. Во-первых, здесь отсутствуют зональные экосистемы тундры и лесотундры, степей и лесостепей, полупустынь и пустынь. Во-вторых, изменения в видовом составе растений происходят уже на стадии необратимых изменений в экосистемах, тогда как в нашу задачу входит определение экологических нормативов, при которых, как уже упоминалось выше, функциональные характеристики экосистем не выходят за пределы естественных колебаний. Основываясь на том, что основными загрязняющими веществами, поступающими



ми в экосистемы в процессе деятельности наиболее экологически опасных объектов газовой отрасли (газоперерабатывающих заводов и газоперекачивающих станций), являются серосодержащие соединения и окислы азота, можно определить основные критерии воздействия последних на сухопутные ландшафты.

В их число, с одной стороны, входит кислотная нагрузка, под которой понимаются среднегодовые концентрации загрязняющих веществ в атмосфере, и плотности сухого и мокрого осаджения веществ на единицу площади территории, с другой - устойчивость естественных ландшафтов, во многих случаях определяемая буферными свойствами почв.

На основе этих критериев можно прогнозировать влияние уже действующих комплексов, определять систематический экологический риск их деятельности, а также решать обратную задачу.

Последняя состоит в том, чтобы определить предельную мощность объектов, их совместное размещение на некоторой территории в зависимости от устойчивости ландшафтов, хозяйственной инфраструктуры и фоновых характеристик загрязнения.

Несмотря на то, что в биогеоценозах почвы являются, как правило, наиболее чувствительным компонентом, отражающим в основном состояние ландшафта (исключение составляют наиболее уязвимые биогеоценозы тундры и пустыни), рассматривать воздействие промышленных объектов следует на экосистему в целом.

Даже если влияние загрязняющих веществ проявляется для одного или нескольких компонентов экосистемы, всегда существует если не прямые, то косвенные показатели воздействия, проявляются вторичные эффекты загрязнения. Так, закисление почв может проявляться в виде уменьшения роста растений, биомассы отдельных видов в пределах некоторой площади; может нарушаться устойчивость отдельных видов к неблагоприятным погодным условиям, насекомым - вредителям, возбудителям болезней и т.п.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Mudan K.* Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. *Progr. Energy and Combust. Sci.*, 1984, v. 0, N 1, p. 59-80.
2. *Маршал В.* Основные опасности химических производств, М., Мир, 1985, 672 с.
3. *Куликов В.С. и др.* Исследование воспламеняемости древесины под влиянием внешнего потока излучения. *Вестник АН БССР, сер. физ.-энерг. наук*, 1983, N1, с. 90-94.
4. *Андросов А.С., Бартак М.К.* Экспериментальное исследование воспламенения древесины под влиянием тепловых потоков. В сб.: "Пожароопасность веществ и материалов", М., 1982, с. 174-177.
5. *Самотаев А.В.* Исследование времени воспламенения веществ и материалов при пожаре. *Пожар. техн. тактика и автомат. установки пожаротушения*, М., 1989, с. 137-147.
6. *Сапунов Н.Е.* Устройство и эксплуатация складов сжиженных газов. М.: Недра, 1979, 228 с.
7. *Lanoy A.* Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre. Paris, Imprimerie Louis-Jean, 1984, 390 p.
8. *Pietersen C.M.* Consequence of accidental releases of hazardous material, *J. Loss Prev. Proc. Ind.*, 1990, v.3, p. 136-155.
9. *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, New York, 1989, 319 p.
10. *Methods for the calculation of physical effects*, CPR 14E, Committee for the prevention of Disasters, Second edition 1991.
11. *Risk analysis of six potentially hazardous industrial objects in the Reijnmand area, pilot study.* //Reidel 1982. XX 793p.

12. *R.M.J. Withers, F.P. Lees* The assessment of major hazard: the lethal toxicity of chlorine. *J. of Hazardous Materials*, v.12, 1985, p. 231-282.
13. *R.M.J. Withers, F.P. Lees* The assessment of major hazard: the lethal toxicity of chlorine. *J. of Hazardous Materials*, v.12, 1985, p. 283-302.
14. *N.A. Eisenberg, C.J. Lynch, R.J. Breeding.* Vulnerability model. A simulation system for sing damage resulting from marine spills. *Nat. Tech. Inf. Service, Report AF-A102-245*, Spr Va., 1975.
15. *W.W. Perry, W.P. Articola.* Study to modify the vulnerability model of the risk management system, U.S. Coast Guard, Report CG-D-22-80 (NTIS ADA 084214), 1980.
16. *Rijnmond Public Authority.* Risk analysis of six hazardous industrial objects in the Rijnmond area. A pilot study, Reidel, Dordrecht, 1982.
17. *N.C. Harris, A.M. Moses.* The use of acute toxicity data in the risk assessment of the accidental release of toxic gases, *Fourth Int. Symp. on Loss Prevention in Process Industries*, Chem. Ind., Rugby, v.1, 1983, p. 136.
18. *W.F. ten Berge, M.V. van Heemst.* Validity and accuracy of a commonly used toxicity in risk analysis, *Fourth Int. Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion in Process Industries*, Chem. Ind., Rugby, v.1, 1983, p. 11.
19. *Drechser-Park D.M., Bedi J.F., Horvath S.M.* // *Amer. Rev. Respirat. Disease*. 1984. V. 6. P. 1033.
20. *Shepson P.B., Kleindienst T.E., Edney E.O. et al.* // *Environ. Sci. Technol.* 1986. V. 20. P. 265.
21. *Horvath S.M., Bedi J.F., Drechsler-Parks D.M.* // *J. Air Pollut. Control Assoc.* 1986. P. 265.
22. *Drechsler-Parks D.M., Bedi J.F., Horvath S.M.* // *Am. Rev. Respir. Dis.* 1984. V. 130. P. 559.
23. *Thomas G.B., Fentas J.D., Ehrlich R., Gardner D.E.* // *J. Toxicol. Environ. Health*. 198. P. 559.
24. *Wichmann H.E., Mueller W., Allhoff P.* // *Environ. Health Perspect.* 1989. V. 79. P. 89.
25. "Методические указания по определенной реальной аэрогенной нагрузке канцерогенов на население (на примере бензапирена)" /Согласовано заместителем начальника Глав санитарно-эпидемиологического управления Минздрава СССР/ Утверждено заместителем Председателя Ученого медицинского совета Минздрава СССР/, Министерство здравоохранения, М., 1984.
26. *T.D. Jones, P.J. Walsh, A.P. Watson, B.A. Owen, L.W. Barnhouse, D.A. Sanders.* *Risk Anal.* V.8, N1, p. 99-118.
27. *Krewski, D., Van Ryzin, J.* Dose response models for quantal response toxicity data. *Current Topics in Probability and Statistics* (M. Csorgo, D. Dawson, J.N. Rao, E. Saleh, Eds.), N. Holland, in press.
28. *Hogan, M.D., Hoel, D.G.* Extrapolation to man. In: *Methods in Toxicology* (A.W. Hayes, Ed.), Raven Press, New York, pp. 711-731.
29. *Mantel, N., Bryan, W.* "Safety" testing of carcinogenic agents. *JNCI* 27:455-470 (1961).
30. *Mantel, N., Bohidar, N.R., Brown, C.C., Ciminera, J.L., Turkey, J.W.* An improved Mantel-Bryan procedure for "safety" testing of carcinogens. *Cancer Res.* 35:865-872 (1975).
31. *Safe Drinking Water Committee, Drinking water and health, National Academy of Sciences*, Washington, DC, 1977.
32. *Scientific Committee of the Food Safety Council.* Quantitative risk assessment. *Food Cosmet. Toxicol. Environ. Health* 8:379-386 (1981).
33. *Haseman, J.K., Hoel, D.G., Jenrich, R.I.* Some practical problems arising from the use of gamma multi-hit model for risk estimation. *J. Toxicol. Environ. Health* 8:379-386 (1981).
34. *Farber E.* *Cancer Res.*, p. 217-223, 1984.
35. *Wilson R., Crouch A. J.* *Environ. Health, USA*, p. 264-270, 1985.
36. *Moskowitz P.D., Morris S.C., Fischer H., Thode H.C., Hamilton J.D., Hamilton L.D.* *Risk Anal.* v.5, N3, p. 181-194.
37. *M. Tancrede, R. Wilson, L. Zeise, E.A. C. Crouch.* *Atmospheric Environment*, 1987, v. 21. N 10. p. 2187-2205.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И ПОСТРОЕНИЯ ЗОН ПОТЕНЦИАЛЬНОГО УЩЕРБА

После выбора и вычисления характерных  $n$ -мерных полей физических параметров (концентраций, потоков энергии и т.д.) следующим этапом является определение зоны негативного воздействия, т.е. перевод текущих физических параметров или их интегральных значений (доз) в последствия с использованием граничных критериев воздействия.

Как уже отмечалось, обоснование показателей риска от какого-либо объекта должно проводиться на реальной картографической подоснове. Построение на генплане предприятия, т.е. на единой масштабированной основе полей граничного физического воздействия означает по существу "оконтуривание" некоторой зоны (выделение площади с характерной геометрией), в пределах которой возможно (вероятно) определенное поражение субъекта, вплоть до летального исхода. Таким образом, величина и геометрия площади потенциального поражения могут служить некоторым критерием опасности от того или иного сценария возникновения и развития аварий.

Сценарии реализации аварийного потенциала в виде поражения следует условно подразделять на первичные и вторичные. Так к первичным относятся сценарии аварий, связанных с выбросом токсичных веществ, пожарами, взрывами типа BLEVE, огневыми шарами и т.п., т.е. аварий "прямого действия", возникновение которых уже само по себе способно вызвать физическое поражение. Ко вторичным - такие, возникновение поражения от которых (т.е. ущерб) требует наличия дополнительных условий или факторов реализации. К этому типу следует отнести взрывы паровых облаков, которые наступают только при наличии по направлению дрейфа облака источников зажигания определенного типа и при условии, что эти источники функционируют постоянно или в момент подхода к ним облака, а также процессы, связанные с физико-химическими трансформациями в атмосфере исходных веществ в другие, обладающие выраженной токсикой или взрывоопасностью, продукты и ряд других негативных воздействий на биотические компоненты окружающей среды.

Рассмотрим последовательность определения зон поражения для некоторых характерных источников опасности прямого действия (взрывы твердых веществ, диффузное горение углеводородов с открытой поверхностью). Для указанных аварий при распространении физических (термических, барических) характеристик в изотропной среде атмосферы зона поражения в первом приближении может быть принята симметричной и описана кругом с некоторым радиусом, зависящим от масштабов и условий протекания аварии. При использовании пробит-функций, например, для термического воздействия огневого шара с массой 32 т на неподвижный субъект, функция поражения в зависимости от расстояния от центра шара имеет вид, представленный на рис. 47. Близкие по виду кривой на рис. 47, формы зон поражения могут быть построены для всех перечисленных сценариев аварий.

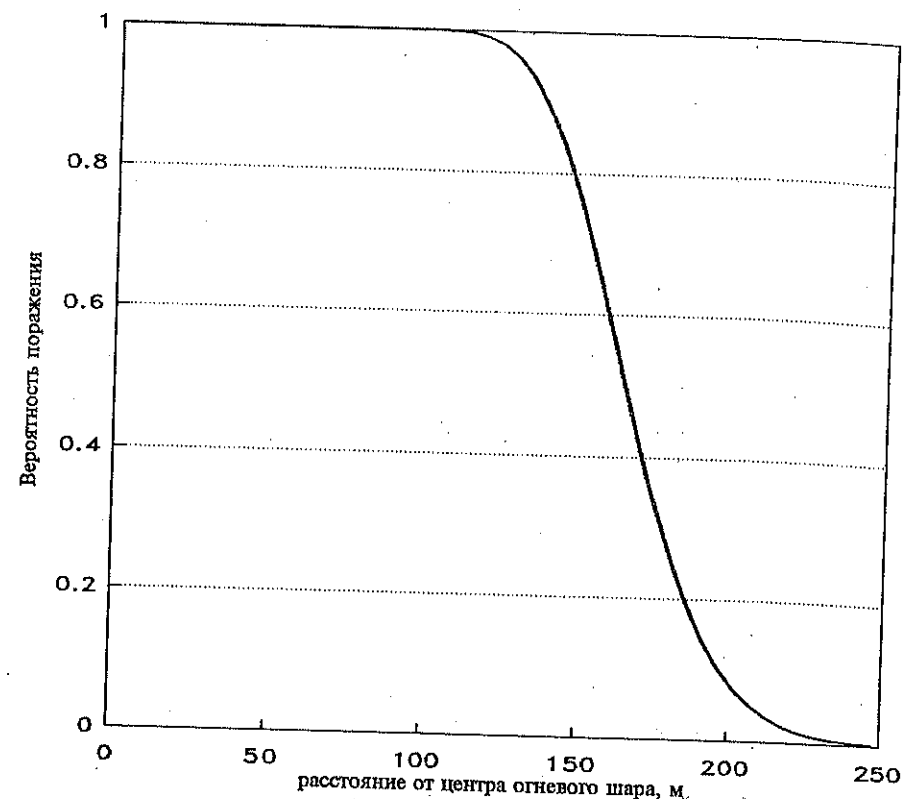
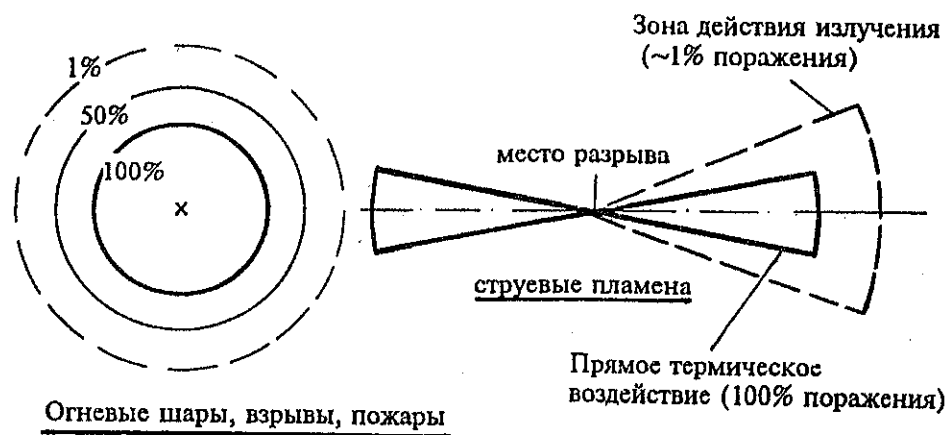


Рис. 47. Вероятность термического поражения в зависимости от расстояния при аварии типа "BLEVE" (масса СУГ - 32 тн)

Для струевых пламен, возникающих при разрывах трубопроводов высокого давления с последующим загоранием истекающего газа, форма зоны поражения описывается угловым сектором с длиной факела, зависящей от специфики горения (свойств газа, давления и диаметра трубопровода) и с примерным "углом раскрытия" факела для углеводородных газов метанового ряда 15 - 20 градусов. Если истечение происходит независимо из двух концов трубопровода, то зона поражения характеризуется симметричной фигурой, представленной на рис. 48. Следует также учитывать, что за счет начального импульса высокоскоростной струи газа, в месте разрыва имеются физические предпосылки к возникновению колебаний (отклонений от исходной оси) двух концов трубопровода и к его фрагментарному разрушению, что может значительно расширить сектор(а) возможного поражения. Заметим, что вид зон поражения для приведенных выше сценариев аварий практически не зависит от изменения метеорологических параметров окружающей среды.



**Рис. 48.** Геометрические формы зон поражения при авариях со взрывами, пожарами, огневыми шарами и струевыми пламенами.

Наибольшую сложность в определении зон поражения представляют такие аварийные процессы, в которых распространение в окружающей среде физических параметров (потенциальной опасности) осуществляется под действием ветра. К таким процессам относятся, в частности, процессы дрейфа токсических и взрывоопасных газов и паров.

Для токсических выбросов "токсическая нагрузка" за время "Т" вычисляется для каждой точки пространства с полярными координатами "r, Θ" относительно источника опасности и записывается в виде:

$$D(r, \Theta) = \int_0^T C(r, \Theta, t) dt$$

Формальная доля поражения субъектов (в случае их нахождения в указанной точке в течение заданного периода времени) от токсической нагрузки (дозы) вычисляется через интегральную функцию ошибок с использованием в качестве аргумента пробит-функции:

$$P_{пор} = f(Pr) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} e^{-t^2/2} dt,$$

$$Pr = a + b \ln D$$

На рис. 49 представлены рассчитанные этапы оценки вероятности и доли поражения от воздействия выброса с постоянной интенсивностью, содержащего токсическое вещество (сероводородсодержащий природный газ), в течение определенного интервала времени Т. Обычно Т определяется регламентом действий при ЧС или

продолжительностью аварийного процесса. В рассматриваемом примере Т 10 минут. На рис. 49 А схематично показаны сечения 1, 2 и 3 дрейфу облака сероводородсодержащего газа с убывающими вдоль оси Х (по направлению ветра) концентрациями токсиканта. В сечениях 2 и 3 выбраны осевые точки 1 и 2, на рисунке 49 Б показан рост концентрации токсиканта за 10 минут, в которых дрейфующее облако воздействует на субъекты (время экспозиции), у помещенные в эти точки, а также увеличение за указанный период времени доз, воспринимаемых субъектами в тех же точках. На рисунке 49 В показано изменение концентраций токсиканта в сечениях 1, 2 и 3 облака на различной линии от источника выброса, на рисунке 49 Г для тех же точек представлены интегральные кривые результаты расчета токсической нагрузки  $D(r, \Theta)$ . Рисунок демонстрирует завершающий этап оценки вероятности поражения дрейфующим облаком субъекта, условно размещенного в пределах выбранных сечений. Так, на площади, ограниченной кривой 2 и осью абсцисс, максимальная доля поражения составляет 0,8, а на площади, ограниченной кривой 3 и осью абсцисс - 0,3. Для сечения 3 на рис. 49 Д пунктирной линией показана приведенная ширина зоны поражения, величина которой характеризует площадь абсолютного поражения (приведенную ширину определяют отнесением площади, ограниченной кривой 3 и осью абсцисс, к 100 %-ному у поражению субъекта).

На рис. 50 приведен пример зависимости формы зон ущерба для различных скоростей ветра и классов устойчивости атмосферы. Видно, что во всех случаях форма зон ущерба имеет листообразный вид, который определяется специфическим сочетанием скорости ветра и класса устойчивости атмосферы зона ущерба уменьшается по площади.

Зоны токсического поражения от каждой конкретной аварийной ситуации рассчитываются отдельно для случаев нахождения людей на открытой местности и в помещениях, поскольку в последнем случае учитывается буферный эффект, связанный с конечной скоростью воздухообмена "V". В обычных помещениях кратность естественного воздухообмена ω не превышает 2.

Если принять, что попавший внутрь помещения газ "мгновенно" распределен по всему объему, а кратность воздухообмена есть величина постоянная, то изменение концентрации токсиканта внутри помещения  $C_{in}(t)$  будет связано с аналогичным изменением концентрации снаружи помещения  $C_{ex}(t)$ , уравнением:

$$\frac{dC_{in}(t)}{dt} = -\frac{1}{T} \times [C_{ex}(t) - C_{in}(t)] \quad (5.1)$$

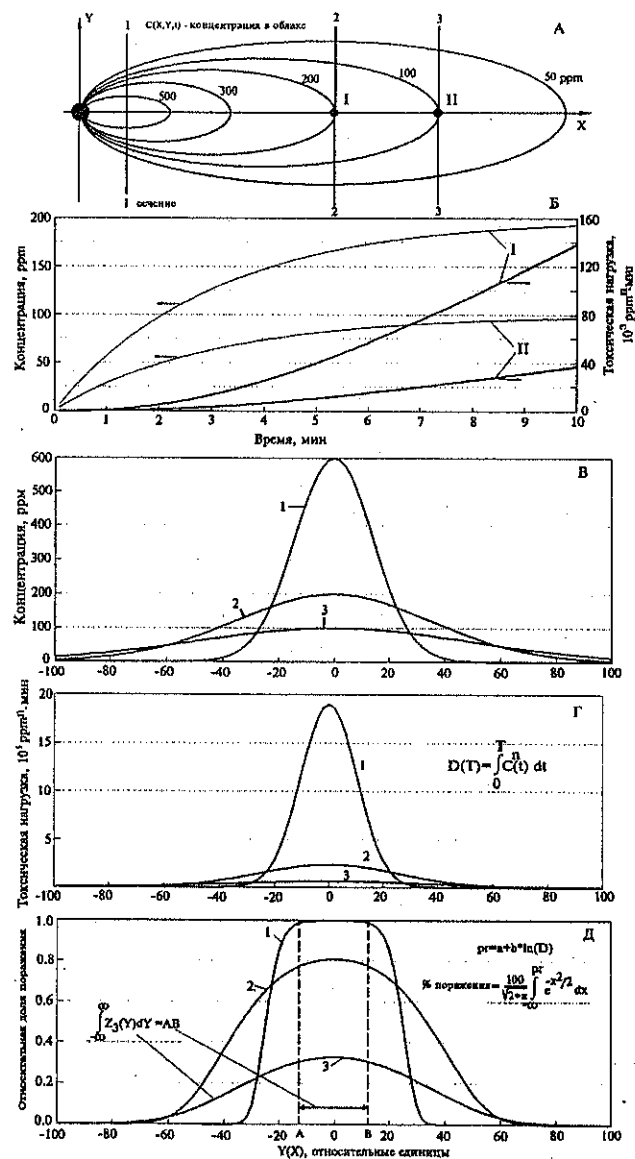
где:  $T=V/\omega$  - характеристическое время воздухообмена

Данное дифференциальное уравнение может быть решено после подстановки конкретного вида функции  $C_{ex}(t)$ .

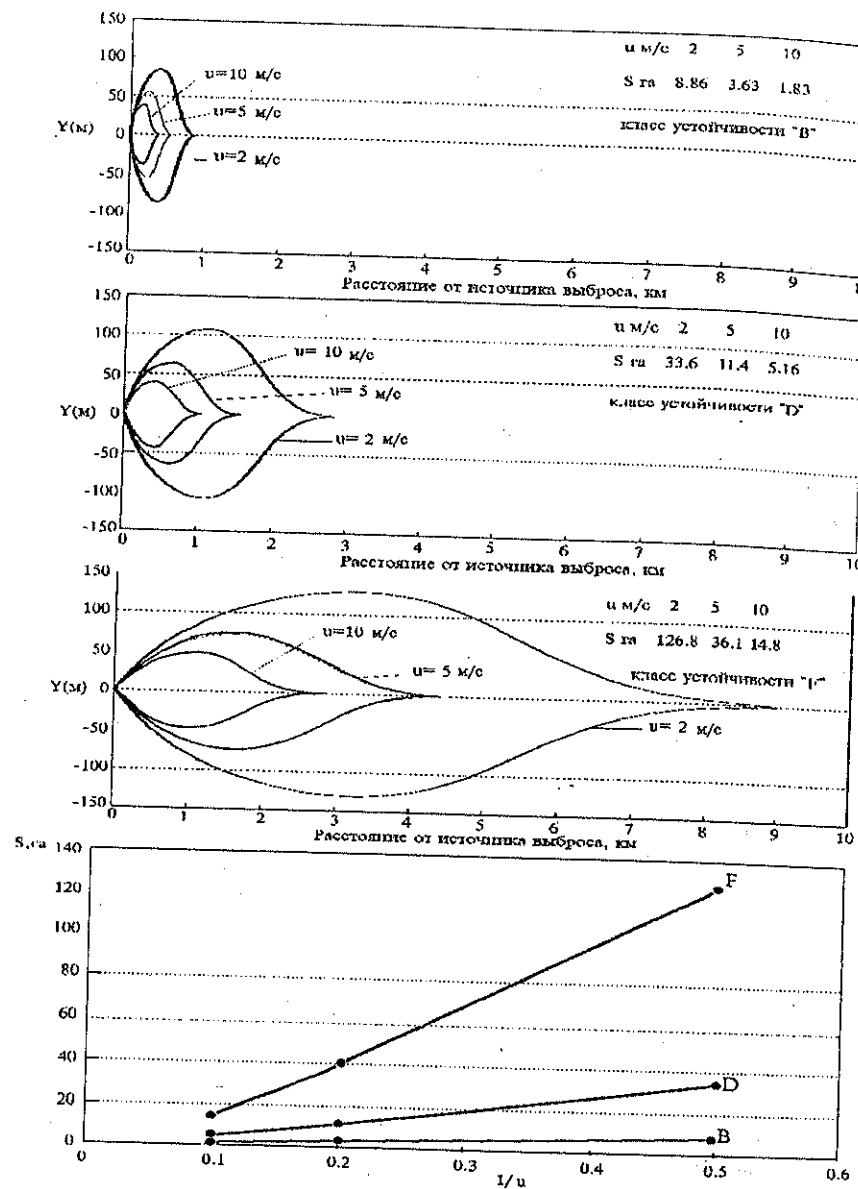
Практический интерес представляют собой два вида функции  $C_{ex}(t)$ :

- 1) Концентрация снаружи постоянна;
- 2) Концентрация снаружи распределена по нормальному закону.

Для первого случая предполагается, что в момент времени  $t=0$



**Рис. 49.** К анализу территориального распределения опасности от выброса токсичных веществ. А - схема сечений облака по ширине (изоконцентрации); Б - изменение концентрации токсичного вещества и его токсической нагрузки для различных точек в течение 10 мин; В - профили концентраций по сечениям; Г - профили токсической нагрузки по сечениям на момент времени 10 мин; Д - профили доли поражения (— приведенная ширина поражения сечения 3).



**Рис. 50.** Зависимость формы зон ущерба  $Y(x)$  и площадей поражения  $S$  скорости ветра  $u$  и класса устойчивости атмосферы (В, Д, Ф). Источник выброса наземный,  $Q = 20$  кг/с  $H_2S$ ; группа риска - персонал завода.

$$C_{in}(t)=0; C_{ex}(t) = \text{const} = C_0$$

Решение задачи выглядит следующим образом:

$$C_{in}(t)=C_0 \times [1 - \exp(-t/T)] \text{ при } t \rightarrow \infty, C_{in} \rightarrow C_0 \quad (5.2)$$

Аналогичное решение получается в случае, когда в помещении концентрация токсиканта в момент времени  $t=t_0$ ;  $C_{in}(t_0)=C^*_0$ , а снаружи равна нулю (обратный "отток"):

$$C_{in}(t) = C_0 \times \exp[-(t-t_0)/T] \quad (5.3)$$

В обоих случаях время ( $t_2$ ) достижения в помещении половинной от максимально возможной концентрации будет составлять величину:

$$t_2 = T \times \ln 2 = 0.69 \times T$$

Если концентрация снаружи является нормально распределенной по времени, что характерно для мгновенных источников выброса, то решая эту задачу также как и предыдущую, для максимальной концентрации в помещении получим

$$C_{in, \max} = \frac{Q}{\pi \times \sigma_y \times \sigma_z \times U} \times (2 \times \pi)^{-1/2} \times \frac{1}{T} \quad (5.4)$$

где:  $\sigma_y, \sigma_z$  - коэффициенты поперечной и вертикальной атмосферной дисперсии;  $Q$  - масса выброса.

Рассмотрим далее сценарий аварии с выбросом под давлением в атмосферу сжиженных углеводородных газов и последующим образованием и распространением в окружающем пространстве углеводородного облака, когда основным фактором возникновения ущерба выступает опасность воспламенения облака от каких-либо внешних источников и его интенсивное (взрывное) сгорание. При загорании облака поражающими факторами являются термическое воздействие горячей паровоздушной смеси в основном в пределах самого облака (вследствие относительно слабого внешнего излучения) и барическое воздействие расширяющихся продуктов сгорания на окружающие объекты.

При попадании людей, находящихся на открытом пространстве, в зону горения летальный исход составит 100 % поражения. Что касается воздействия ударной волны, то, как показали наши оценки, оно может увеличить уровень поражения лишь при нахождении людей в непосредственной близости от границ облака. Для учета в этом случае дополнительной площади прямого поражения людей от барических эффектов нами в качестве нижней границы зоны ущерба принималось значение концентрации несколько ниже нижнего предела воспламенения ( $C^* = b \times C_{нкл}$ ;  $b < 1$ ).

Следует подчеркнуть, что достижение облаком конкретной точки пространства еще не означает возникновения взрывных процессов, т.е. поражения. Сценарий развития аварийного процесса будет определяться при прочих равных условиях характером распределения по территории потенциальных источников зажигания и их типом (мощность, время действия) (рис.51).

Для простейшего случая линейного расположения источников зажигания направления движения облака истинная вероятность " $P_n$ " воспламенения источника " $n$ " определяется (в случае достижения этого источника облаком) верс  $P_n^*$  "срабатывания"  $n$ -го источника к моменту встречи с облаком и верс отсутствия загорания предыдущих источников  $P_1^*, \dots, P_{n-1}^*$ :

$$P_n = P_n^* \times \prod_{i=1}^{n-1} (1 - P_i^*) \quad (5)$$

где  $P_i^*$  - заданная (исходная) вероятность зажигания облака от  $i$ -ого и (вероятность "срабатывания" источника зажигания в течение времени сушения взрывоопасной концентрации паров в данной точке);

$i$  - номер источника зажигания по ходу движения облака.

Исходная вероятность зажигания облака от энергетического источника ляется экспертами. Так открытые источники огня (печи, факелы, сварка и т.г. вероятность зажигания, равную 1. Причем для облака "тяжелого" газа, харс высота которого, как правило, не превышает 3-5 м, речь должна идти о н или относительно невысоких источниках, а не о факельных установках. В ос случаях (искровой электроразряд, искры из выхлопных труб, тлеющие и сил гретые предметы и т.п.) вероятность зажигания облака от источника прини как правило, значительно ниже единицы и зависит как от соответствующих х ристик горючего газа, так и от мощности источника, специфики формировс лака и ряда других факторов.

Для случая произвольного распределения различных источников по терр вокруг места потенциального выброса задача вычисления функции  $P_i$  осло поскольку необходимо оценивать вероятные ситуации встречи и покрытия ои целым рядом источников по всем направлениям пространства. Более того, зс существования взрывоопасного облака источник может сработать как в подходе к нему облака, так и после его прохождения, в частности, уже при дк нии облаком своих максимальных размеров. На рис.52 представлено вероятн распределение зоны ущерба для различных типов источников загорания с од вой исходной вероятностью срабатывания. Как видно из рисунка, время сраб ния источника зажигания (в момент достижения облаком источника или заж облака при достижении им уже максимальных размеров) в значительной с влияет на площадные характеристики поражения от взрывного сгорания п облаков.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЕЙ ПОТЕНЦИАЛЬН  
ОПАСНОСТИ ДЛЯ ХАРАКТЕРНЫХ СЦЕНАРИ  
РАЗВИТИЯ АВАР

Описав и рассчитав для каждого из характерных аварийных сценариев з  
распространения физических параметров в окружающей среде и обосновав кр  
рии ущерба (с учетом механизма и специфики возникновения последствий в выбр  
ной группе риска), на следующем этапе необходимо получить распределение (п  
потенциальной опасности по территории вокруг источника.

Как было показано выше, для сценариев аварий, связанных со взрывом т  
"BLEVE", пожарами разлитий в пределах обвалований или огневыми шарами, фо  
поля потенциальной опасности совпадает с возможной зоной ущерба в силу с  
метричности физических эффектов относительно исходной точки. При образова  
струевых пламен, направленных горизонтально, поле потенциальной опасности им  
форму круга с радиусом  $L_{\text{струи}}$  и относительной площадью поражения  $\psi_{\text{струи}}/(2\pi)$ ,  
 $L_{\text{струи}}$  - в первом приближении равна длине факела (зона горения), а  $\psi_{\text{струи}}$  - углу  
сектор поражения (радиан) (в частном случае  $\psi_{\text{струи}}$  - угол раскрытия факела).

Для сценариев аварий, зона потенциального ущерба от которых формируе  
под действием (зависит от) параметров окружающей среды, необходимо учиты  
весь спектр ее возможных состояний в пределах характерного периода их изме  
ний (в разрезе года).

Используем сказанное выше в приложении к построению поля потенциальн  
опасности при появлении с единичной вероятностью в некоторой точке "А" п  
странства исходной опасности в виде выброса газа мощностью  $G_A(t)$  и дальнейш  
его распространения вокруг источника за счет переноса под действием ветр  
атмосфере.

Как правило, метеорологическая информация, используемая при расчетах д  
персии в моделях переноса, состоит из расчетных данных по относительной част  
повторяемости ( $P_{vj}$ , %) скоростей ветра ( $U$ , м/с) по географическим направлени  
(по М-румбовой схеме) и в годовом разрезе (табл.37).

Относительная повторяемость  $P_{vj}$ (%) скоростей ветра по  
географическим направлениям в годовом разрезе

Таблица

	V	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	U м/с	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Σ
1	штиль									2.7
2	1-2	0.79	0.83	0.95	1.04	0.60	0.73	0.78	0.61	6.3
3	2-3	2.68	3.08	3.57	3.98	2.32	2.71	2.79	2.13	23.2
4	4-5	3.18	3.65	4.23	4.71	2.75	3.20	3.30	2.52	27.5

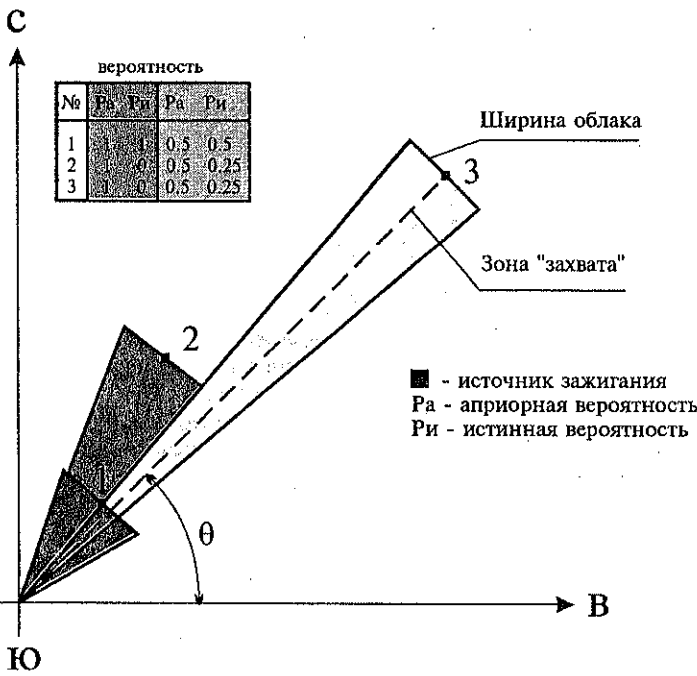


Рис. 51. Влияние расположения источников зажигания на "истинную" вероятность воспламенения облака.

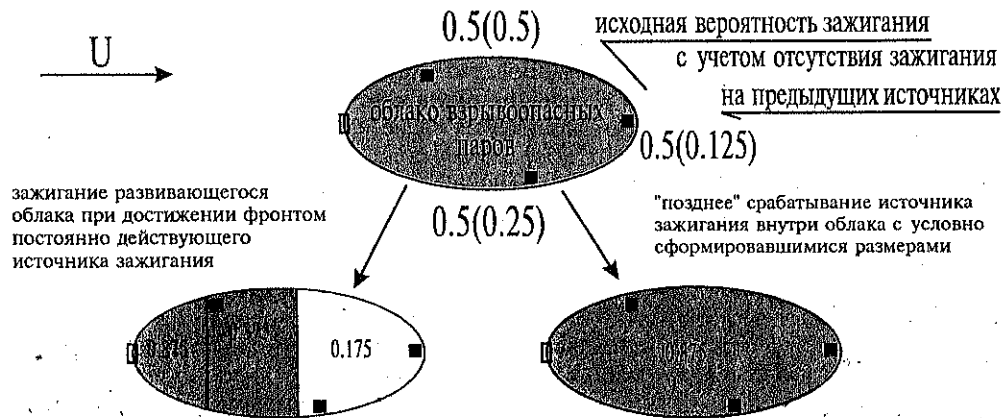


Рис. 52. Схема возможного взаимодействия взрывоопасного облака с источниками зажигания. □ - источник паров, ■ - источник зажигания. 0.875 - вероятность взрыва на покрываемой облаком площади.

продолжение табл. 37										
5	6-7	2.41	2.61	3.00	3.28	1.90	2.28	2.40	1.87	19.76
6	8-9	1.86	1.77	2.00	2.12	1.21	1.54	1.71	1.38	13.59
7	10-11	0.80	0.66	0.73	0.73	0.41	0.57	0.67	0.56	5.13
8	12-13	0.50	0.38	0.41	0.40	0.22	0.32	0.39	0.34	2.96
9	14-15	0.18	0.12	0.12	0.11	0.06	0.10	0.13	0.12	0.93
10	16-17	0.06	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.30
11	18-20	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.13
12	21-24	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03
13	$\Sigma$	12.49	13.16	15.07	16.42	9.49	11.50	12.24	9.58	100.00

Каждая градация скорости ветра (1) характеризуется, в свою очередь, некоторой вероятностью реализации каждого из шести возможных классов устойчивости атмосферы  $P_k(U)$  (табл. 39) (по Паскуиллу в зависимости от градиента температуры табл.38).

**Корреляция состояний устойчивости атмосферы по Паскуиллу с вертикальным градиентом температуры  $\Delta T / \Delta Z$ .**

Таблица 38

отрицательный градиент температуры ( $\Delta T / \Delta Z$ ), град./м	Класс устойчивости
< -1,9 конвекция	A — сильная конвекция
- (1,9 - 1,7)	B — конвекция
- (1,7 - 1,5)	C — умеренная конвекция
- (1,5 - 0,5)	D — нейтральный
+ (0,5 - 1,5)	E — инверсия
+ (1,5 - 4,0) и более	F — сильная инверсия

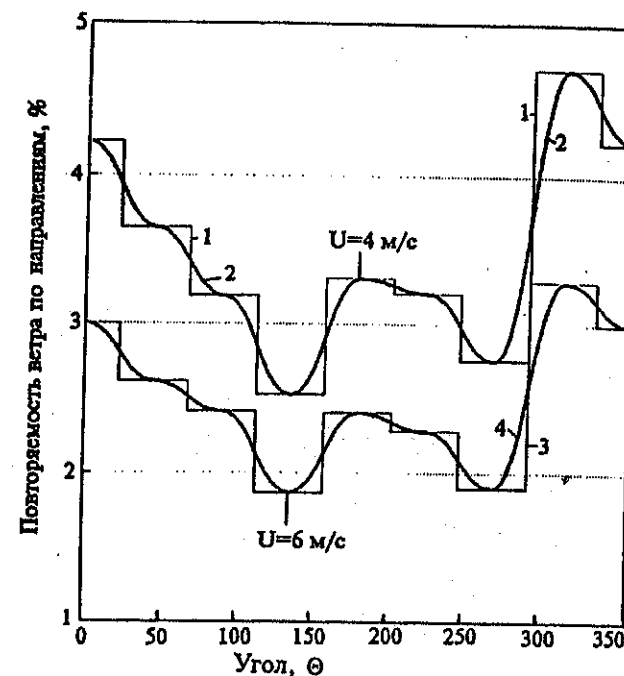
**Повторяемость (%) классов устойчивости атмосферы при заданной скорости ветра на уровне 9 м от поверхности**

Таблица 39

U м/с	апрель-сентябрь (IV-IX)						октябрь-март (X-III)					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
0-1	1.4	7.0	29.8	23.7	4.0	34.1	0.0	0.1	5.3	17.2	20.8	56.6
2-3	3.2	10.5	36.5	28.7	3.8	17.3	0.0	0.0	5.8	23.0	26.0	45.2
4-5	2.2	12.4	39.6	31.0	3.7	11.1	0.0	0.1	6.4	26.0	28.1	39.4
6-7	4.3	11.9	39.4	31.5	3.4	9.5	0.1	0.2	6.7	27.3	29.0	36.7
8-10	4.3	12.2	40.4	32.8	3.7	6.6	0.0	0.2	5.9	26.0	27.2	49.7

Из этих данных видно, что при больших скоростях ветра преимущественно используется класс устойчивости D, а при малых (наиболее неблагоприятные метеоусловия) — практически все классы устойчивости атмосферы.

На рис.53 представлено в виде гистограммы (кривые 1,3) распределение повторяемости ветров со скоростями 4-5 и 6-7 м/с (табл. 32) в зависимости от направления по сторонам света (за нулевое направление принято восточное). Для опр.



**Рис. 53.** Представление частоты повторяемости ветра по сторонам света в виде гистограммы (1,3) и непрерывной функции (2,4) для различных скоростей ветра

После систематизации метеопараметров по 1 скорости ветра и 6 классам устойчивости атмосферы (k) далее можно рассчитать с помощью соответствующих моделей для  $6 \times 1$  вариантов распределения концентраций по характерным географическим направлениям (8 румбов). Задав критерий негативного воздействия (т.е. дозу, нижний предел воспламенения облака, импульс давления при взрыве облака) можно осуществить далее переход от полученных физических полей к зонам потенциального поражения (ущерба) для субъекта. Пример такого набора зон поражения дан в предыдущей главе.

Вероятность появления ущерба в некоторой точке с полярными координатами  $(r, \theta)$  в  $v$ -ом секторе  $M$ -румбовой сетки определяется не только формой "собственной" зоны ущерба, но и возможным влиянием полей с других секторов (рис.54). Поэтому в общем случае вероятность появления ущерба для всех точек пространства при единичной вероятности исходного события рассматривается как сумма вероятностей реализации различных вариантов зон ущерба  $F(M_A, U, k)$ , т.е.

$$R_M(r, \theta) = \sum_{v=1}^M \left[ \sum_{i=1}^L P_i \left\{ \sum_{k=1}^6 P_k(U) \times \Phi \left[ F(M_A, U, k) \right] \times M / (2\pi) \right\} \right] \quad (6.1)$$

где  $\Phi F(M_A, U, k)$  - ширина зоны ущерба в  $v$ -ом секторе для " $M$ " градаций по направлениям сторон света на расстоянии " $r$ " от источника опасности и при угле " $\theta$ " в полярных координатах.

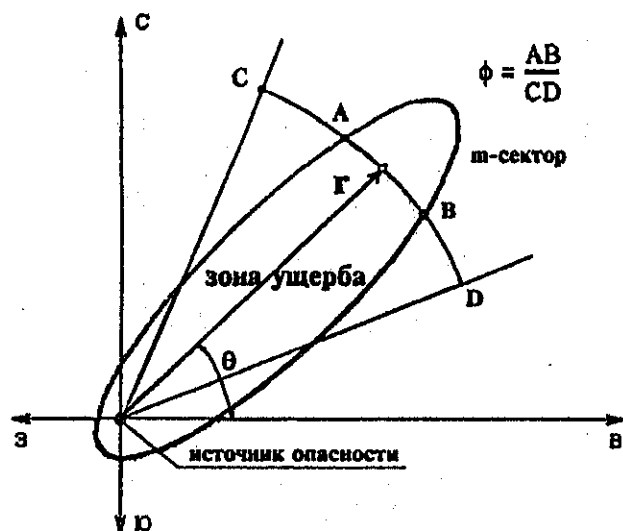


Рис. 54. К вычислению вероятности потенциального ущерба в точке  $(r, \theta)$

Отметим, что суммирование проводится в начале по классам устойчивости атмосферы при заданной скорости ветра, затем по градациям ветра и в конце по секторам.

Таким образом, в случае влияния состояния окружающей среды на механизм формирования последствий для каждого сценария исходного выброса с мощностью или массой  $M_A$  для построения поля потенциальной опасности необходимо анализировать  $6 \times L$  вариантов зон ущерба с учетом их относительной вероятности реализации по различным направлениям сторон света.

На рис.55 приведены виды полей потенциальной опасности для сценариев от выходов шаров и токсического поражения, а также вид сечений этих полей. Из рисунка видно, что относительная вероятность токсического поражения убывает обратно пропорционально расстоянию от места аварии. В связи с этим введем так называемых "пороговых расстояний удаления" для объектов с токсической опасностью по аналогии с объектами со спецификой взрывоопасности, неправомерно поскольку вид полей потенциальной опасности для последних может быть охарактеризован в первом приближении кругом с пороговым радиусом (рис. 55А), за которым не наблюдается негативного воздействия. Более того при построении полей потенциальной опасности для токсических эффектов следует проводить дифференциацию субъектов по восприятию токсиканта, а также рассчитывать как минимум два вида полей с учетом нахождения субъектов риска вне и внутри помещений.

Как было показано ранее, зона ущерба от взрыва паровых облаков во многом зависит от распределения источников зажигания по окружающей территории. Поскольку масштабы дрейфа облаков определяются при прочих равных условиях характеристиками атмосферы, то проводя вычисления по всем точкам сетки с заданным граничным значением концентрации ( $C^* = b \times C_{\text{крит}}; b < 1$ ), можно построить карту вероятности достижения (КВД) в разрезе года облаком (как фактором потенциальной опасности летального исхода при загорании) различных точек на плоскости вокруг источника. Однако, как уже отмечалось, достижение облаком конкретной точки пространства еще не означает возникновения взрывных процессов, т.е. поражения. Более того, в отличие от сценария токсического поражения, построенная таким образом карта (поле) вероятности достижения облаком соответствующих точек может при определенных обстоятельствах не совпадать с полем (масштабами) потенциально поражения. Речь идет о принципиальной возможности возникновения детонационного сгорания облака, когда площадь изобарного поражения может на порядок более превысить площадь распространения пожароопасной концентрации, а также о возможности дополнительного поражения людей за счет вторичных эффектов (разрушение зданий и сооружений, каскадные эффекты и т.п.). Однако, как показывает специальный анализ статистики, относительная вероятность возникновения подобных многофакторных процессов крайне незначительна и они в методическом плане к какому-либо практического значения не имеют.

Для учета взаимовлияния источников зажигания на возникновение и масштаб ущерба на масштабированной картографической основе из распределения источников зажигания с исходной вероятностью "срабатывания" ( $P^*$ ) строится распределение источников с истинной вероятностью ( $P$ ) (рис. 51, 52, глава V). При этом расчет принимается сектор влияния такого источника, угол "раскрытия" которого равен  $2 \times L_u / r_u$  ( $L_u$  - ширина облака в точке расположения источника загорания координатами  $(r_u, \theta_u)$ ). В начале выбирается ближайший к источнику образования паров источник их загорания. Для всех источников в данном секторе, удаленных на расстояние, большее  $r_u$ , вычисляется изменение истинной вероятности зажигания на величину  $(1 - P^*)$ . Далее выбирается следующий по близости источник зажигания, процедура вычислений повторяется. Зная вероятность достижения взрывоопасным облаком различных точек территории и истинную вероятность срабатывания каждого из источников зажигания  $P_i(r_i, \theta_i)$ , можно будет рассчитать вероятность воспламенения облака, т.е. возникновения ущерба. Например, для случая непрерывного выброса для всех точек  $(r, \theta)$ , которых физически может достичь пожароопасное облако и для которых расстояние от объекта меньше или равно расстоянию  $(r_i, \theta_i)$  до  $i$ -ого источника загорания, вероятность ущерба от взрыва рассчитывается как:



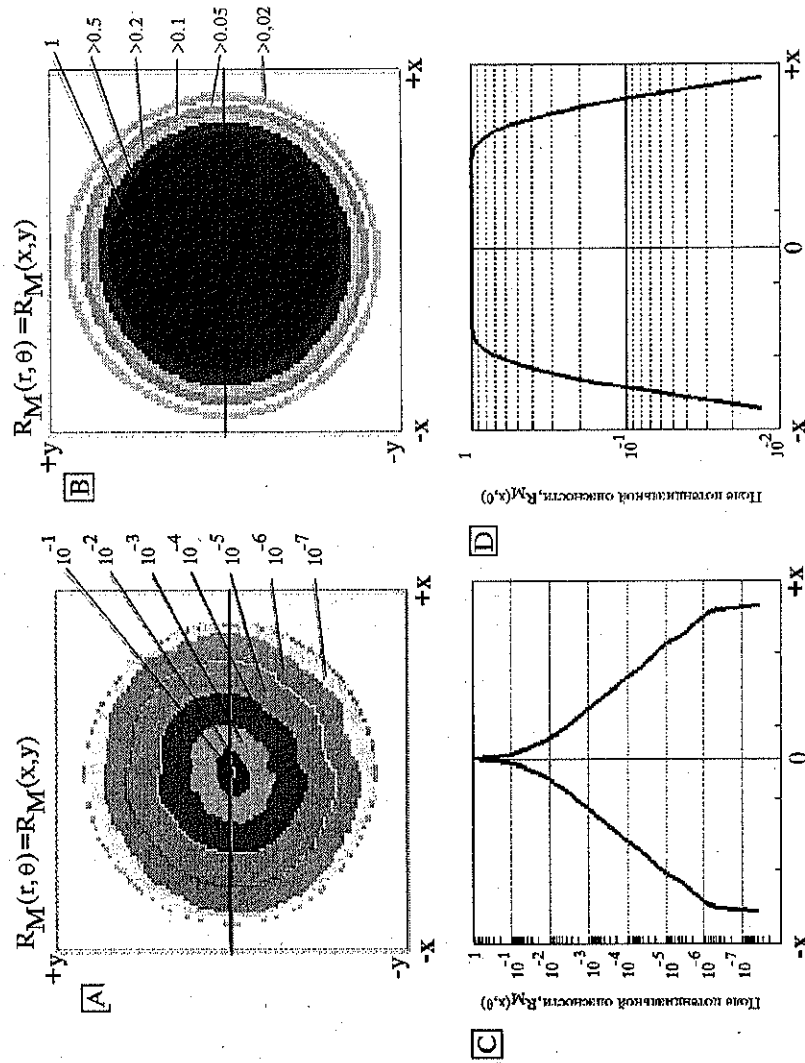


Рис. 55. Примеры полей потенциальной опасности и их сечения  $R_M(x, y=0)$  для сценариев аварий с выбросом токсических веществ (A, C) и пожаров и огневых шаров (B, D).

$$RM(r, \theta) = \sum_{i=1}^N R_{Di}(r_i, \theta_i) \times P_i(r_i, \theta_i) + SW \quad (6.2)$$

где  $SW = 0$  для всех возможных источников зажигания, способных поджечь объект при подходе к ним (то есть по "передней кромке");

$SW = \sum_{i=1}^N R_{Di}(r_i, \theta_i) \times P_i(r_i, \theta_i)$  для источников загорания, возникающих уже после прохождения облака и достижения им условно максимальных размеров;

- $R_M(r, \theta)$  - вероятность ущерба, первоначально равна 0; ущерб реализуется при попадании субъекта в зону поражения;
- $R_{Di}(r_i, \theta_i)$  - вероятность достижения паровым облаком i-го источника загорания.
- $R_D(r > r_i, \theta_i)$  - вероятность достижения паровым облаком точки  $r > r_i$  в секторе влияния i-го источника загорания.

Данный подход к построению распределения потенциальной опасности показывает, что однотипные объекты со сжиженными газами даже с одинаковым исходным аварийным потенциалом (масса выброса) и при одинаковых метеорологических характеристиках представляют различную опасность для персонала и населения при различных распределениях источников зажигания.

В силу указанных особенностей развития и реализации аварийного потенциала геометрическая форма поля  $R_M(r, \theta)$  для взрывов паровых облаков имеет звездчатый вид, при этом лучи оканчиваются на месте источника загорания при условии, что источник загорания возник или существует к моменту подхода к нему облака или облако покрывает весь сектор влияния источника загорания с учетом максимальной протяженности дрейфа облака.

Для реальных объектов потенциальное поле опасности для источников зажигания, встречающихся на пути облака, будет представлять собой нижнюю границу вероятности поражения, а для источников, возникающих после достижения облаком максимальных размеров - верхнюю (рис.52).

В заключение отметим, что представление опасности в виде полей учитывает не только сценарий и специфику развития аварийных процессов, но и влияние всей совокупности природно-климатических факторов региона. Применительно к анализу конкретных технологических объектов такие поля являются необходимыми первичными элементами, из которых "конструируется" в дальнейшем поле риска для территории.

В тех случаях, когда источник опасности представляет собой линейный объект - железная дорога, автомагистраль, трубопровод и т.п., при построении полей потенциальной опасности необходимо учитывать специфику воздействия линейного объекта. В некоторых случаях для описания поля потенциальной опасности от линейного источника возможно получение аналитического решения. К таковым относятся сценарии аварий с симметричными полями физического воздействия, т.е. с пожарами и огневыми шарами, зоны ущерба для которых можно представить в виде круга соответствующего радиуса  $R < R_0$  (см.рис. 56). Тогда на уровне опасности в определенной точке пространства оказывает влияние только так называемый характеристический линейный размер ( $L, R_0$ ) линейного источника. По мере удаления от линейного источника характеристический размер уменьшается (эффект наложения полей) и выражается функцией

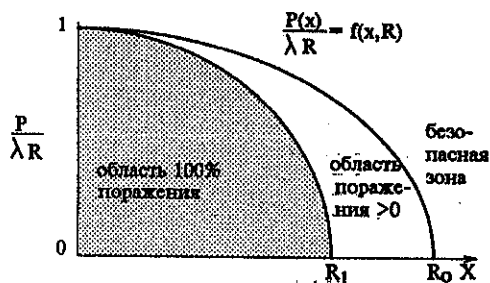
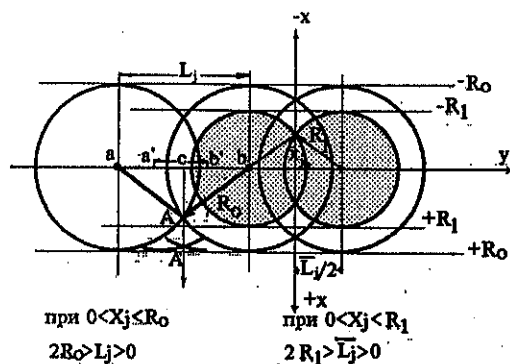


Рис. 56. К обоснованию зон поражения при авариях на линейных источниках опасности.

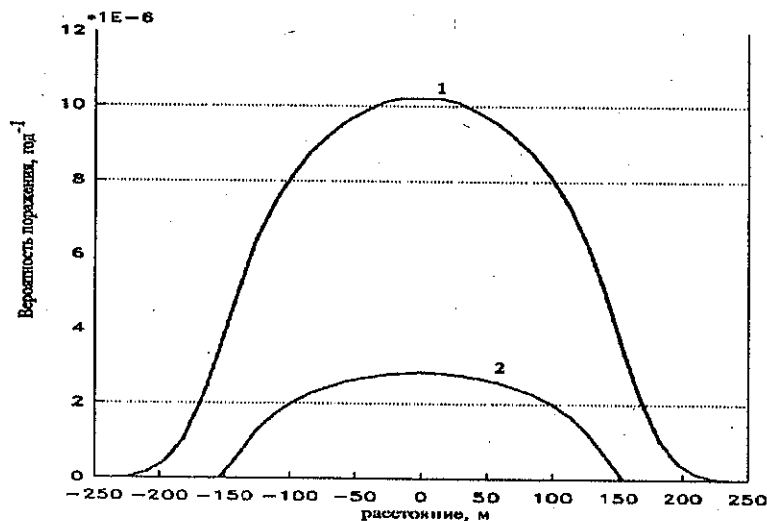


Рис. 57. Профиль поля потенциальной опасности при авариях типа "BLEVE"  
1 - для людей на открытой местности, 2 - в помещениях.

$$L(x) = 2 \times R_0 \times \sqrt{1 - (x/R_0)^2} \quad (6.3)$$

где  $x$  - расстояние по перпендикуляру от оси линейного источника,  $R$  - максимальный радиус поражения ("граница безопасности").  
Поле потенциальной опасности для таких сценариев аварий имеет в сечении куполообразный вид с центром в источнике опасности (рис. 57).

Величина  $L(x)$  по смыслу характеризует приведенное расстояние линейного источника опасности, оказывающее влияние на удалении " $x$ " от оси, т.е. характерную зону влияния линейного источника опасности.

В тех случаях, когда аналитическое вычисление зон потенциальной опасности невозможно, проводят интегрирование с использованием вычисленных полей опасности для точечных объектов вдоль направления, определяемого в пространстве линейным источником (ось  $y$ ):

$$L(x) = \int_{-\infty}^{\infty} R_M(x, y) dy \quad (6.4)$$

Вид сечения  $L(x)$  - приведенной зоны влияния линейного источника опасности случая аварий при перевозках токсических веществ по железной дороге - приведен на рис. 58. Отдельно показаны профили для людей вне и внутри помещений для минутного сценария существования облака, а также суммарный профиль в предположении о соотношении людей внутри и вне помещений - 10:1.

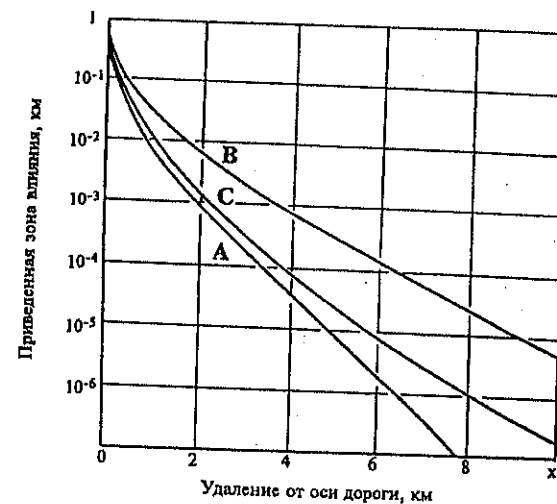


Рис. 58. Вид "приведенной зоны влияния" -  $L(x)$  линейного источника опасности для случая симметричного воздействия относительно оси железной дороги при перевозках токсичных веществ: А - для людей внутри помещений; В - для людей на открытой местности; С - суммарный для соотношения людей внутри и вне помещений - 10:1.

Отличие размерности полей для точечного и линейного источника опасности связано с различным представлением степени аварийности  $\lambda$  (частоты реализации сценариев аварий). Для точечного источника опасности  $\lambda$  имеет размерность - год<sup>-1</sup>, а для линейного - (год·км)<sup>-1</sup>, т.е. нормируется на единицу длины.

Для получения поля риска  $R(x,y)$  необходимо провести умножение поля потенциальной опасности (характеристика последствий при авариях) на частоту их возникновения:

$$R(x,y) = \lambda \times R_M(x,y) \quad (6.5)$$

Для сценариев с образованием, дрейфом и взрывом паровых облаков суммирование необходимо проводить с учетом взаимного расположения источников загорания. Для каждой отдельной точки вид поля потенциальной опасности будет представлять собой лучеобразную структуру в зависимости от типа источника загорания и вероятности достижения облаком этого источника, но при суммировании этих структур возникает интегральное поле с распределением опасности, локализованным в основном в местах нахождения источников загорания (рис. 59). Так для сценария с образованием облаков с вероятностью  $2 \times 10^{-5}$  на элементе линейного объекта 30 м (рис. 59а) интегральное поле вероятности достижения облаком различных участков территории (рис. 59б) по линейному объекту в целом характеризуется максимальной вероятностью  $2.3 \times 10^{-4}$  в год, что является верхним пределом опасности от взрыва для данного объекта. Учет реального расположения и вероятности загорания для источников загорания дает суммарно уровень потенциальной опасности значительно меньше. Так на рис. 59в и 59г приведены поля потенциальной опасности для трех источников загорания с эффективной вероятностью срабатывания 1.0, 0.5 и 0.1, расположенных на одинаковом удалении от линейного опасного объекта. Видно, что форма поля потенциальной опасности весьма сильно зависит не только от характеристики опасности самого линейного объекта, но и от территориального взаиморасположения источников загорания.

Рассмотренная выше методология оценки потенциальной опасности линейных источников применима к случаям, когда интенсивность отказов  $\lambda$  одинакова по всей трассе. В большинстве реальных случаев необходимо ранжирование трассы линейного источника опасности с точки зрения влияния на интенсивность отказов природно-климатических, технологических, временных, социальных и других факторов. Для иллюстрации на рис. 60 приведена условная схема ранжирования трассы. Для получения интенсивности отказов на конкретном участке трассы необходимо проанализировать степень влияния каждого фактора и его весовую долю в общей системе влияния на данном участке, т.е. для конкретного участка трассы определить специфическое множество аварийных сценариев  $\Omega(w_i, M_i, N_i)_{i=1,2,\dots,n}$ . В общем случае локальную интенсивность отказов можно представить в виде:

$$\lambda_{ij} = \sum_{n=1}^N k_n \times F_{ni} \quad (6.6)$$

где  $k_n$  - степень влияния фактора "n" на интенсивность аварийных отказов,  $F_{ni}$  - доля фактора "n" на участке "i".

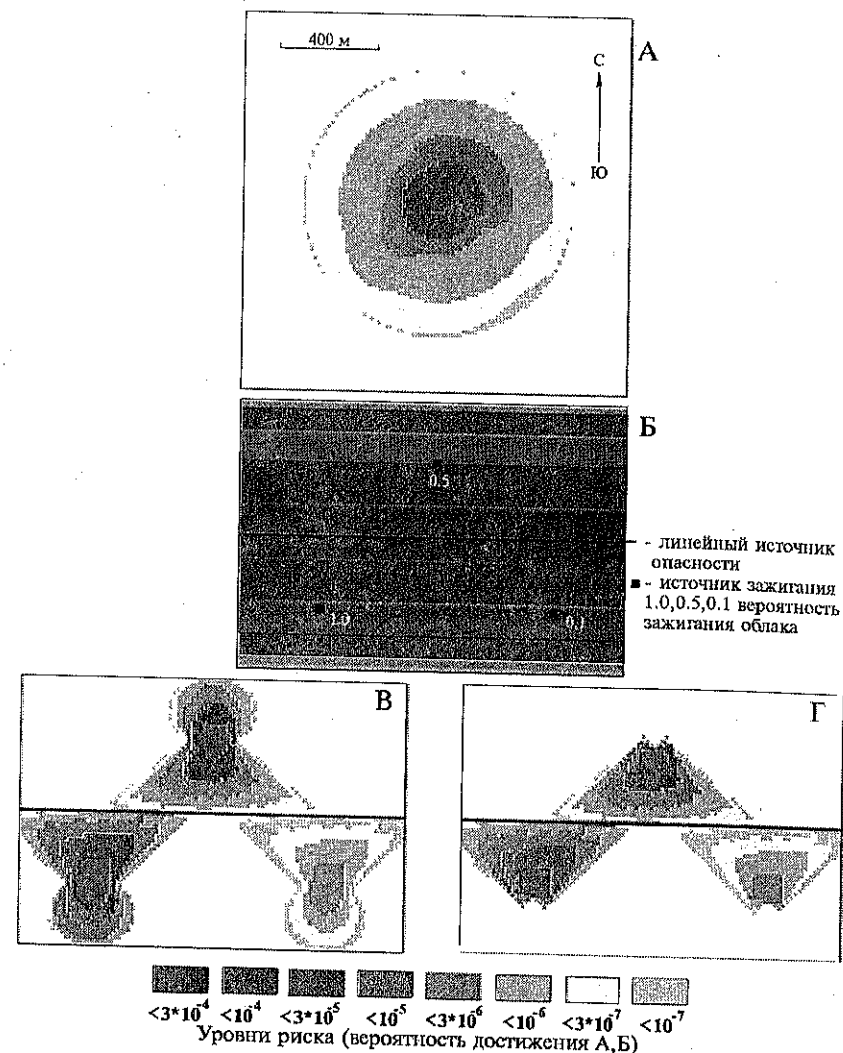


Рис. 59. К описанию расчета риска от линейного источника опасности.

А - карта вероятности достижения от единичного отрезка трассы с вероятностью  $3.2 \cdot 10^{-5}$  на 14 м. трассы; Б - интегральная карта вероятности достижения взрывоопасного облака от линейного источника опасности; В - поле потенциальной опасности для источников загорания случайного типа ( $P_i$  - 1.0, 0.5, 0.1); Г - поле потенциальной опасности для источников загорания постоянного типа.

# РАСЧЕТЫ И ПОСТРОЕНИЕ ПОЛЕЙ РИСКА НА КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ОСНЕ

После выявления на каждом из принятых к рассмотрению объектов всех аварий (суммарное количество равно -  $N$ ), специфики их возникновения и расчета полей потенциальной опасности этих аварий ( $R_{mi}(x,y); i=1, N$ ) и определение вероятности реализации их негативного потенциала ( $\lambda_i; i=1, N$ ) проводится построение локальных (для каждого сценария с конкретной привязкой к источнику опасности) и интегральных полей риска на масштабированной картографической основе.

$$R_z(x,y) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \times R_{mi}(x,y) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \times R_{mi}(r,\theta) \quad (7.1)$$

Суммирование проводится по причине взаимной независимости зон ущерба для рассматриваемых аварийных сценариев.

Получаемая карта  $R_z(x,y)$  характеризует интегральную вероятность того или типа негативного воздействия при условии, что субъект воздействия с вероятностью 1 находится в конкретной точке пространства в момент реализации рийного процесса. Эта величина в большинстве работ трактуется как величина индивидуального риска.

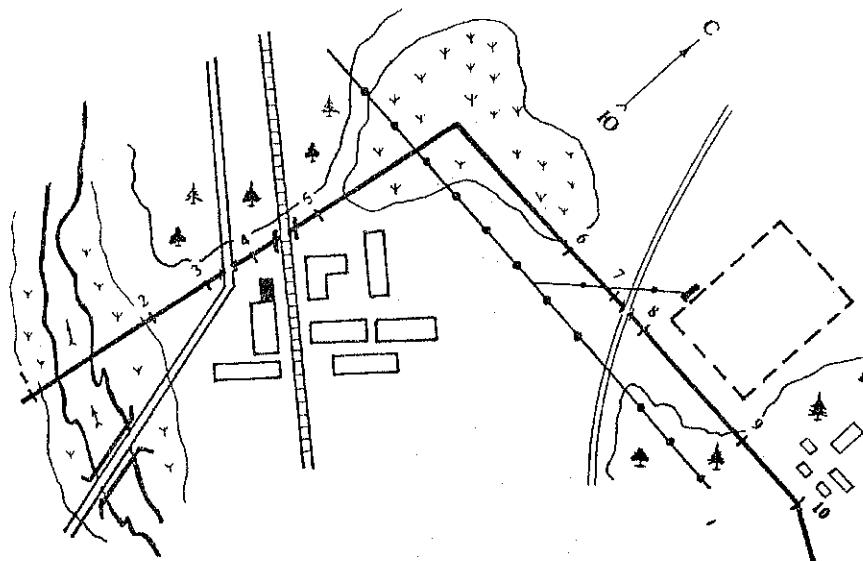
Если анализу подвергается не один объект, а система технологических объектов (суммарное количество -  $J$ ), распределенных по территории, то проводится суммирование полей потенциальной опасности для каждого источника с учетом взаимного расположения.

$$R_z^*(x,y) = \sum_{j=1}^J R_{zj}(x,y) \quad (7.2)$$

В силу взаимной независимости построения полей  $R_{zj}(x,y)$  для каждого объекта можно получить оценку влияния аварий на одном объекте - на другие. Это особенно важно для сценариев со взрывами и пожарами, поскольку для этих случаев важна вероятная развитие аварий по принципу "домино", т.е. каскадное развитие сценариев, что зачастую приводит к максимальным негативным последствиям.

Примеры получения карт риска для конкретных объектов приведены в практических приложениях.

В таблице 40 приведены принятые в зарубежной практике математические выражения, характеризующие риск и его интегральные показатели.



1-2 - полноводный речной переход (заболоченная пойма); 3-4 - пересечение с автодорогой федерального значения; 4-5 - пересечение с электрофицированной железной дорогой; 5-6 - прохождение вблизи крупного населенного пункта, лесного массива, железнодорожного узла; 6-7 - прохождение через сильно заболоченную местность; 7-8 - пересечение с грунтовой дорогой лесхоза; 8-9 - прохождение вблизи промпредприятий специального назначения; 9-10 - прохождение вблизи деревни; 6-10 - прохождение параллельно ЛЭП высокого напряжения.

	$\sum_{i=1}^N L_i$			
	$L_1$	$L_2$	$L_1$	$L_j$
$\Delta t_1$	$\lambda_{11}$	$\lambda_{21}$	$\lambda_{11}$	$\lambda_{j1}$
$\Delta t_2$	$\lambda_{12}$	$\lambda_{22}$	$\lambda_{12}$	$\lambda_{j2}$
$\Delta t_3$	$\lambda_{13}$	$\lambda_{23}$	$\lambda_{13}$	$\lambda_{j3}$
$\tau$				

**Рис. 60.** Ранжирование интенсивности аварий по длине (трасса трубопровода или маршрута следования) и во времени с учетом технической и региональной специфики.

Таблица 40.

## Уравнения для вычисления некоторых стандартных показателей риска

Индивидуальный риск в точке $(x,y)$ (уровень потенциальной опасности)	$R_z(x,y) = \sum_i \lambda_i \times E_i(x,y) \times F_i$
Максимальный уровень индивидуального риска (потенциальный)	$R_z(x_m, y_m) = \max(R_z(x,y))$
Средний индивидуальный риск	$IR^{av} = (\sum_{x,y} R_z(x,y) \times N(x,y)) / \sum_{x,y} N(x,y) = F/N$
Суммарный риск (общее число смертельных исходов)	$F = \sum_{x,y} R_z(x,y) \times N(x,y) = IR^{av} \times N$
Экономический эквивалент социального ущерба	$ESC = \sum_i C_i \times N_i \quad (1.2 < p < 2)$
$\lambda_i$ – вероятность выброса по сценарию $i$ $E_i(x,y)$ – вероятность реализации механизма воздействия $i$ в точке $(x,y)$ для сценария выброса $i$ $F_i$ – вероятность летального исхода при реализации механизма воздействия $i$ $N(x,y)$ – численность людей в ячейке (единичной площадке) с координатами $(x,y)$ $N$ – общее количество людей, подвергающихся потенциальному негативному воздействию $C_i^*$ – вероятность негативных последствий при реализации аварийного сценария $i$ $N_i$ – количество смертельных исходов при реализации аварийного сценария $i$	

Как видно из этой таблицы, основой для вычисления показателей риска является распределение риска по территории. Сам индивидуальный риск (потенциальная опасность) в конкретной точке характеризует риск от рассматриваемой опасности, которому подвергался бы человек, находящийся в этой точке в течение года. Величина индивидуального риска (потенциальной опасности) не зависит от распределения населения или персонала, а отражает тот уровень потенциальной опасности, который создает по объективным причинам конкретный объект. Для того, чтобы отличать понятие среднего индивидуального риска (величина среднего риска в выделенной группе субъектов: персонал предприятия, население поселка и т.п.) от распределения величины индивидуального риска по территории, для последнего нами применяется понятие распределения потенциальной опасности с определенными последствиями (например, летальный исход) - рис. 61. Таким образом, получаемые карты интегральных показателей потенциального риска  $R_z(x,y)$  на территории региона по всем характерным сценариям и принятым к рассмотрению объектам используются (с учетом дополнительной информации о пространственно-временных распределени-

ях людей в данном районе) для определения абсолютного риска для населения дифференциации групп населения по уровням риска.

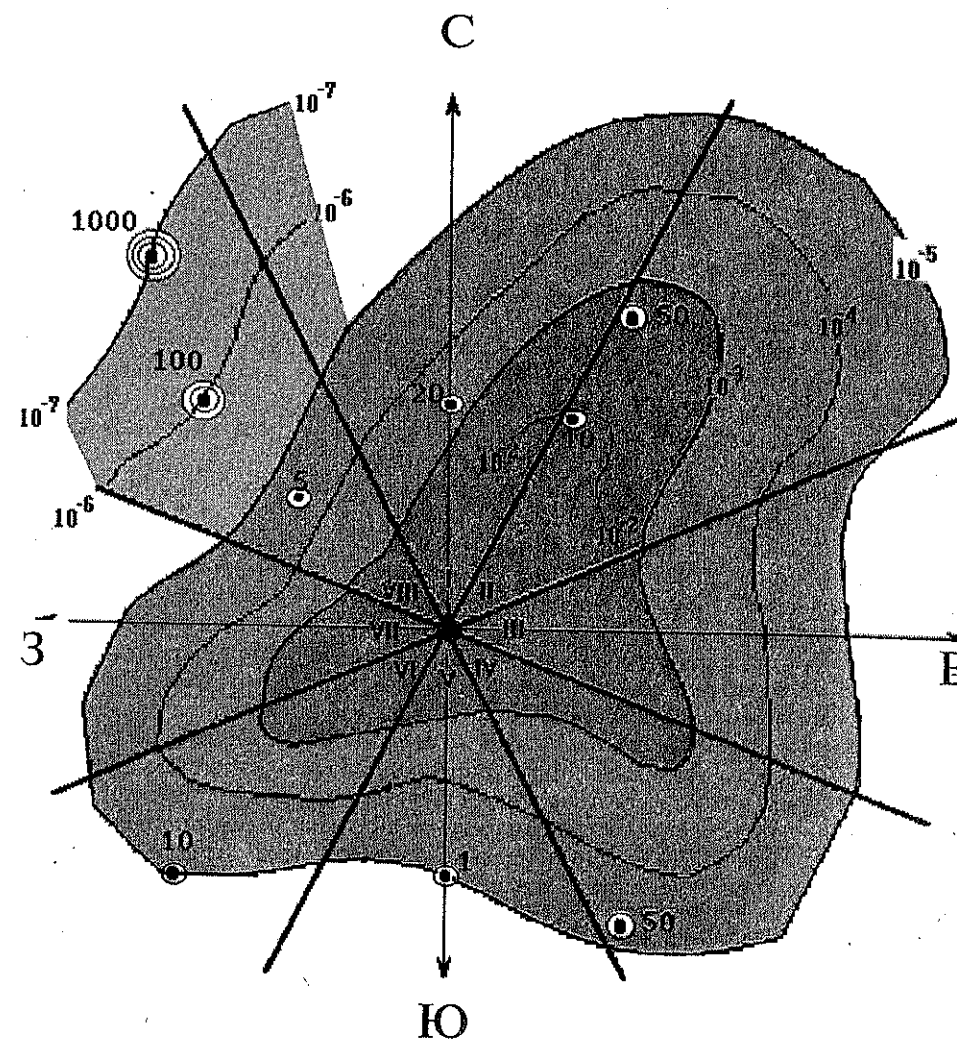


Рис. 61. Распределение потенциальной опасности (вероятности появления определенного вида и уровня ущерба -  $10^*$  вокруг источника.  
 10 - число субъектов воздействия в точке на момент реализации опасности.

Наличие таких карт для каждого из рассмотренных сценариев аварий и объектов позволяет взвесить величину ущерба для них и определить приоритетность решения проблем по снижению риска до приемлемого уровня за счет определенных технических и организационных мероприятий.

Имея карты распределения потенциального риска (РПР) и зная функцию плотности распределения населения  $N(x,y)$  для данного региона, может провести количественную оценку риска для населения в пределах локальных территорий. На последнем этапе оценивается величина коллективного риска, т.е. интегральное количество смертей в год от данного вида хозяйственной деятельности в пределах данной территории:

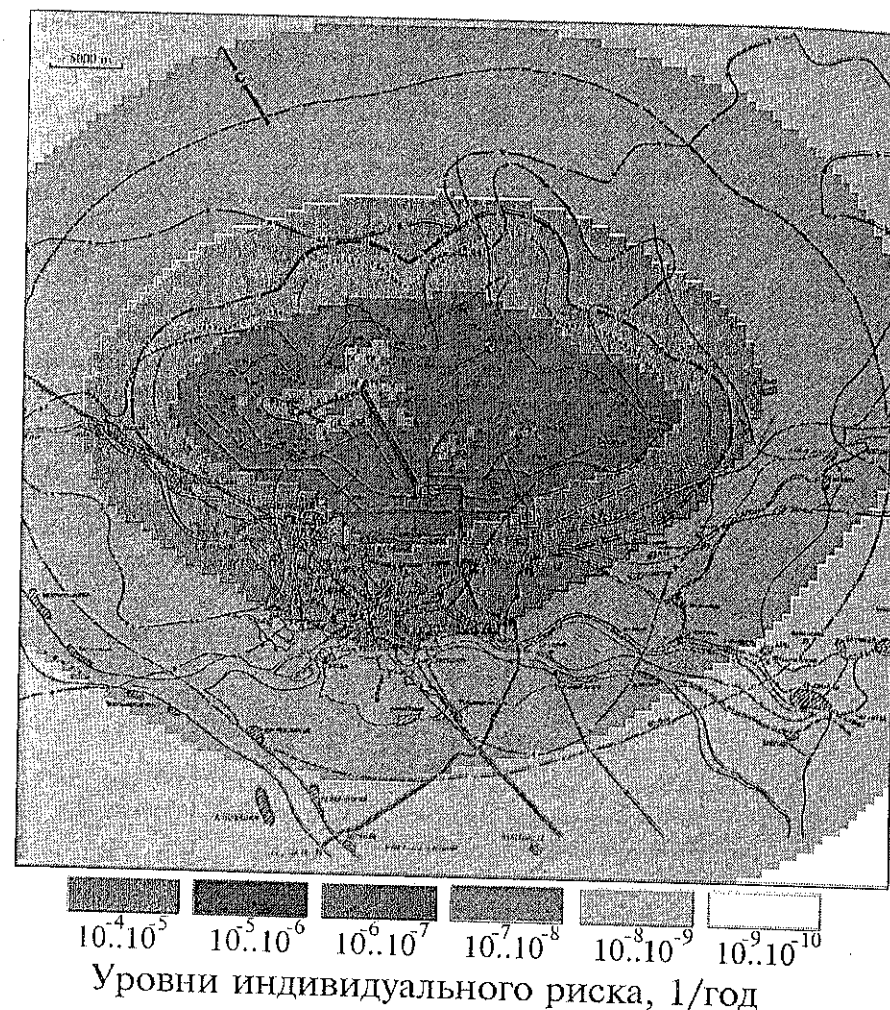
$$F = \int_S R_{\Sigma}^*(x,y) N(x,y) ds \quad (7.3)$$

Величина  $F$  представляет собой количественную оценку опасности, которая используется далее в сравнении рисков и при принятии решений по увеличению уровня безопасности по региону в целом.

Для оценки интегральных характеристик риска для случая токсического поражения следует учитывать тот факт, что субъекты воздействия могут находиться в различных "пространственно-временных состояниях", которые влияют на получаемую дозовую нагрузку. Эти "состояния" во многом зависят от действий конкретных людей в условиях чрезвычайной ситуации (ЧС). В качестве характерного примера на рис. 62 представлено интегральное поле потенциальной опасности токсического поражения населения в 10-ти километровой санитарно-защитной зоне на Астраханском газохимическом комплексе. Практически на всех объектах, использующих высокотоксические вещества, на сегодня разработаны и реализуются планы действия в условиях ЧС. Так при возникновении токсических аварий обычно предусмотрено: заблаговременное оповещение населения, эвакуация населения из прогнозируемых по метеословесиям зон поражения (населенных пунктов). С населением проводится разъяснительная работа по обучению действиям в условиях ЧС. Вся эта совокупность мероприятий обеспечивает определенную вероятность избегания опасности при ее появлении. Поэтому при расчете РПР с учетом системы реагирования необходимо вводить поправочную зависимость, отражающую вероятность избегания опасности (адекватные действия) или наоборот, вероятность неадекватных действий -  $w(t)$ . В этом случае выражение в таблице 40 следует модифицировать, вводя дополнительный временной сомножитель для расчета индивидуального риска. Тогда вероятность возникновения некоторого ущерба в точке "А" можно описать, как

$$R_{\Sigma}(x,y) = \sum_{ij} \lambda_i \times E_{ij}(x,y) \times F_i \times w(t) \quad (7.4)$$

По своей сути  $w(t)$  отражает динамику среднестатистического поведения субъектов риска. Очевидно, что наличие индивидуальных средств защиты практически гарантирует полное избегание опасности. При этом вероятность  $w(t)$  будет характеризовать по существу только вероятность неисправности этих средств или их отсутствия вследствие так называемого человеческого фактора.

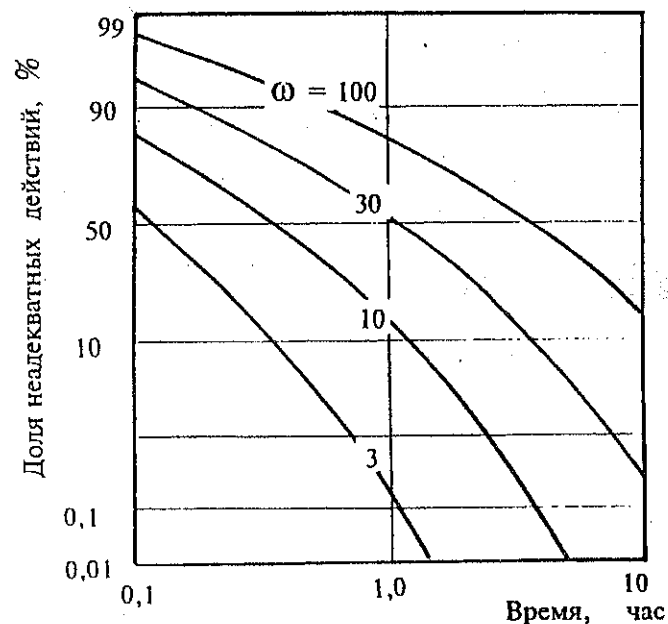


**Рис. 62.** Интегральное поле потенциальной опасности токсического поражения при авариях с выбросом сероводорода на объектах АГКК (в условиях неадекватного поведения населения при ЧС)

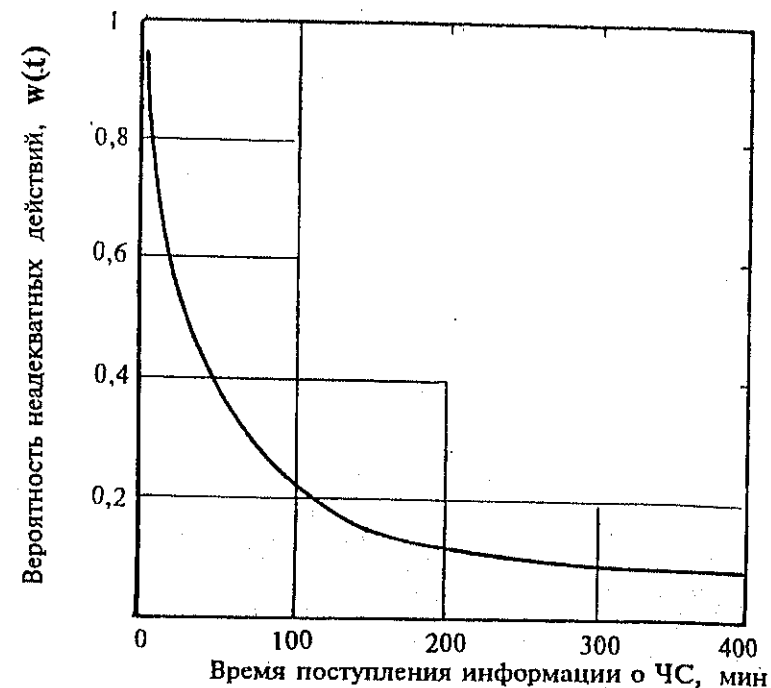
В условиях ЧС при отсутствии какого-либо конкретного плана действий можно предположить, что поведение населения будет полностью неадекватным (консервативная оценка), т.е.  $w(t) = 1$ . В случае наличия "Плана..." и системы оповещения вероятность неадекватного поведения населения уменьшается. Эта величина зависит также при прочих равных условиях от площади, с которой должна быть проведена эвакуация, и от плотности проживающего на ней населения. В качестве иллюстра-



трации этого положения на рис. 63 представлена диаграмма Агентства по защите окружающей среды (ЕРА, США), характеризующая степень неадекватности действий (спецслужб, населения) при ЧС в функции интервала времени от момента оповещения об опасности для различных значений параметра  $\omega = F^{0.33} \cdot \bar{N}^{0.4}$  где  $F$  - площадь, на которой должны проводиться соответствующие специальному плану действия (квадратные мили),  $\bar{N}$  - плотность населения (количество людей на квадратную милю). Как показывает практика учений на Астраханском газоконденсатном комплексе, первые 5-10 минут уходят на принятие людьми решения по избеганию опасности (например, выход в заданную точку сбора и т.п.), поэтому данный период можно отнести к периоду неадекватных действий. В период, начиная с 10 мин. и до 30 минут проходят целенаправленные действия по избеганию опасности. В случае продолжительного дрейфа токсичного облака (более получаса) все, кто был заранее оповещен об опасности, уже смогут предпринять необходимые действия по избеганию опасности. Однако в общем случае необходимо учитывать, что определенный контингент населения, несмотря на наличие всех необходимых систем и средств будет реагировать неадекватно. Характер зависимости  $w(t)$  для специфических условий Астраханского ГКК приведен на рис. 64. Учет динамики поведения субъектов при ЧС приводит к существенному изменению РПР. Так риск токсического поражения на значительном удалении от источника выброса уменьшается в несколько раз, в то время как вблизи него практически не изменяется (см. рис. 65). Этот подход позволяет сделать количественные оценки эффективности планирования действий при ЧС.



**Рис. 63.** Влияние срабатывания систем раннего оповещения и эффективности действия населения и спецслужб в условиях ЧС на относительные масштабы поражения.

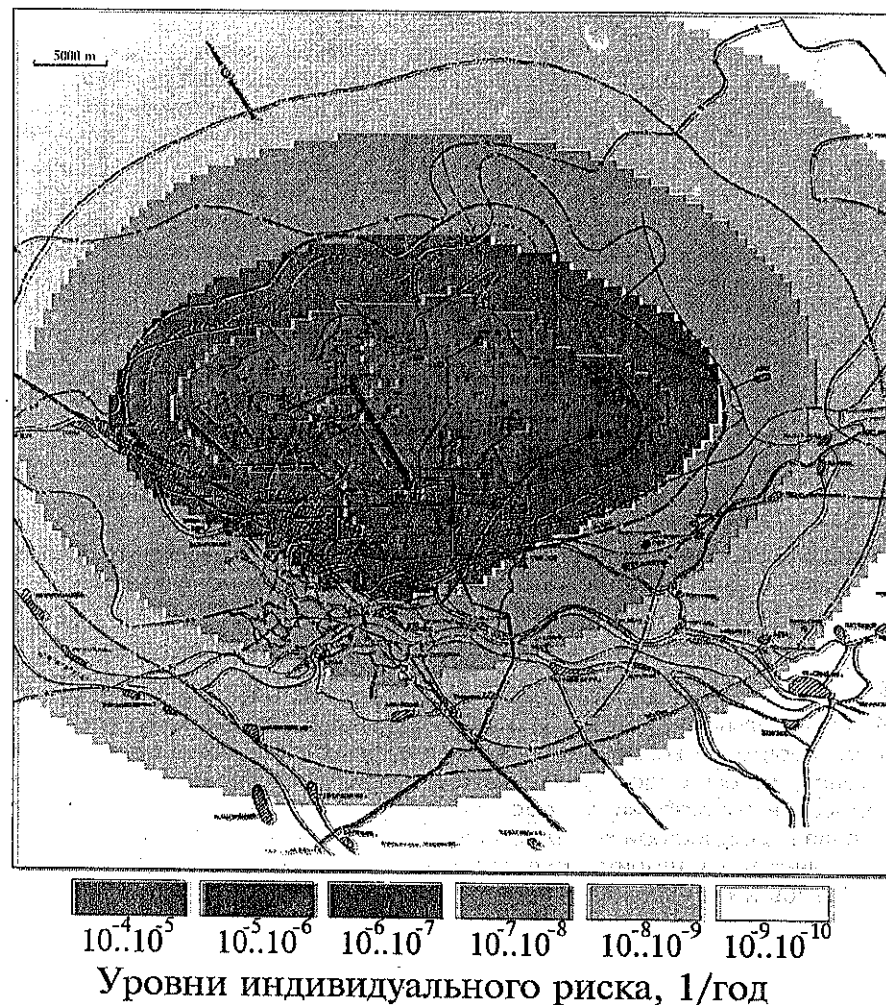


**Рис. 64.** Вероятность неадекватных действий при токсической опасности для населения Астраханского ГКК в условиях применения плана чрезвычайных мероприятий.

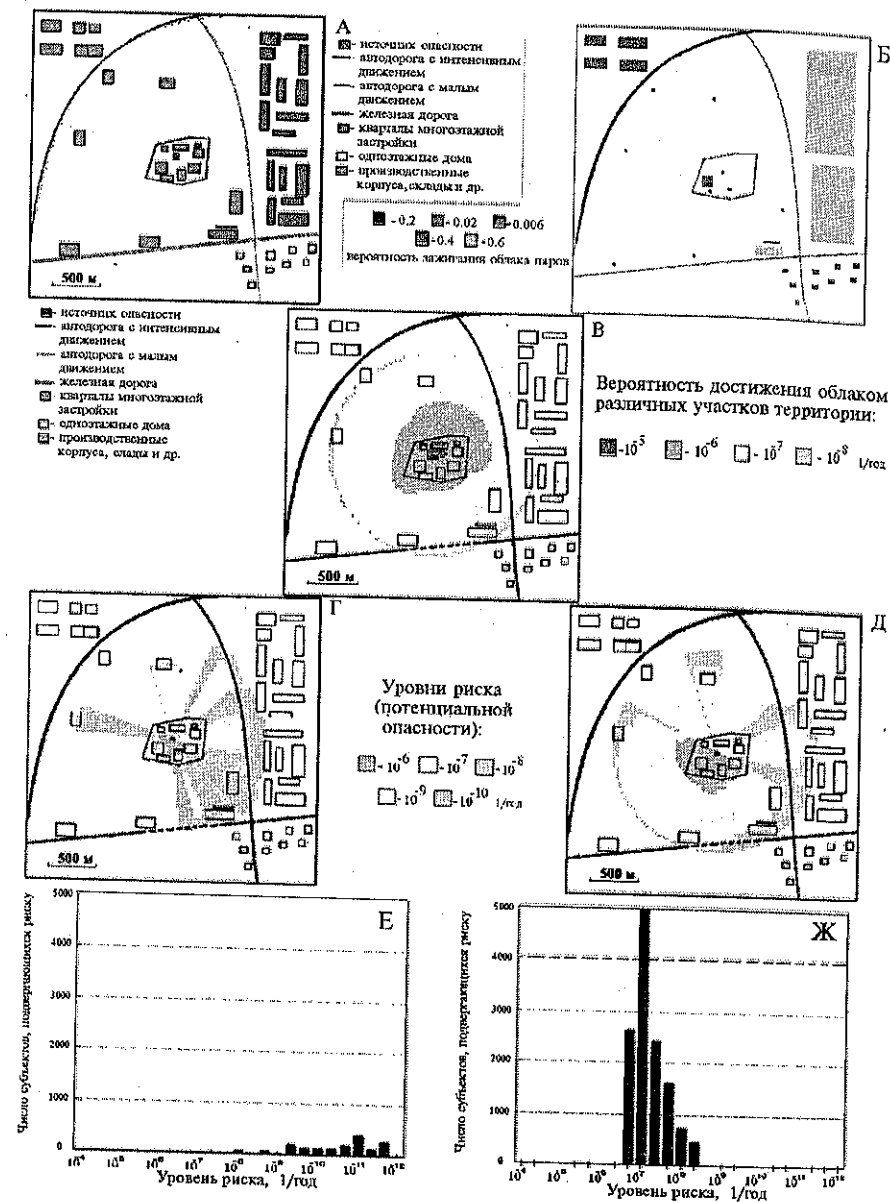
На рис.66 приведены последовательные этапы построения и анализа распределений потенциального риска  $P(x,y)$  и дифференциации населения по уровням риска  $N(x,y)$  на территории вокруг источника с повышенной взрывопожароопасностью. этим этапам относятся: ранжирование территории по распределению групп риска; ранжирование территории по распределению различных источников зажигания; построение вероятностной карты потенциального достижения взрывоопасным облаком различных точек территории; построение вероятностного распределения ущерба от взрывов и совмещение в пространстве реального распределения субъектов воздействия и полей потенциальной опасности с целью анализа распределения субъектов негативного воздействия по уровням риска.

Рассматриваемый в данной работе подход в отличие от стандартных позволяет провести реальное ранжирование пространственно распределенных субъектов по уровням риска (зависимость количества населения, подвергнувшегося определенному уровню потенциальной опасности), а также ранжирование территории по направлениям с наибольшим коллективным, т.е. интегральным риском (зависимость интегрального риска по выделенным секторам).

Для аварийных сценариев, связанных с утечками кипящих сжиженных газов, образованием и протяженным дрейфом паровых облаков с последующим возникновением взрывов или пожаров весьма эффективны технические мероприятия по уменьшению риска с использованием систем паровых или струевых водяных завес, систем сигнализации о возникновении пожара или опасных утечек, а также систем блокировки потенциальных источников зажигания паровых облаков взрывоопасных газов. Эти мероприятия положительно сказываются как на масштабах зон поражения, так и на уменьшении вероятности зажигания, что количественно можно оценить, используя предлагаемую методологию оценки риска.



**Рис. 65.** Интегральное поле потенциальной опасности токсического поражения при авариях с выбросом сероводорода на объектах АГКК (в условиях планируемого поведения населения при ЧС)



**Рис. 66.** Этапы проведения оценки риска: А - ситуационный план, Б - ранжиров источников загорания (ИЗ), В - карта вероятности достижения территорий, Г - опасности для постоянных ИЗ, Д - поле опасности для ИЗ случайного характера Е, Ж - распределения людей по уровням риска для случаев Г и Д соответственно



## Особенности построения полей риска для систематических выбросов загрязняющих веществ

Проблема негативных последствий загрязнения окружающей среды является одной из важнейших в принятии решений о безопасности населения региона. Эта задача требует знания как механизма поступления вредных веществ в организм человека (ингаляция, пищевые цепочки, кожный покров), так и соответствующих зависимостей "доза-система реакций" или "доза-эффект" для каждого из загрязнителей. Сложности определения этих показателей для случая загрязнения атмосферного воздуха обсуждались выше в разделе о критериях негативных последствий.

Обычно экологический риск рассматривают как дополнительную вероятность смерти от действия загрязнителей от конкретного источника опасности. В США проведены исследования по определению дозовых зависимостей для уровня малых хронических доз для широкого круга канцерогенных веществ. Как уже отмечалось, для типовых загрязнителей дозовые зависимости определяют на основе экстраполяции данных по "острой" токсичности на низкие дозы с использованием в качестве базы сравнения бенз(а)пирена, или проводя когортные исследования здоровья населения за продолжительный период времени и сравнивая данные "загрязненного" и "чистого" регионов. Например, во французском проекте ERPURS показано, что если в атмосфере городов происходит увеличение на  $1 \text{ мг/м}^3$  концентрации твердых частиц (средний размер 10 микрон) за счет образования продуктов реакции кислых выбросов с аммиаком (сульфатов и нитратов аммония), то дополнительный риск летальных исходов составляет около  $10^{-5}$  на человека в год.

Обычно концентрации загрязнителей, несмотря на возможность значительных изменений в течение года, все же весьма далеки от концентраций острой токсичности. Поэтому для определения риска  $R_i(x,y)$  хронического воздействия малых доз загрязняющих веществ (ЗВ) часто используют линейную зависимость:

$$R_i(x,y) = k_i \cdot C_i(x,y) \quad (7.5)$$

где  $k_i$  - концентрационный коэффициент зависимости "доза-эффект";

$C_i(x,y)$  - среднегодовая концентрация  $i$ -го загрязнителя в точке с координатами  $(x,y)$ .

При вычислении совместного воздействия нескольких загрязнителей риски от отдельных компонентов суммируются:

$$R_z(x,y) = \sum R_i(x,y) \quad (7.6)$$

Таким образом, при известной зависимости "доза-эффект" задача вычисления поля риска сводится к определению распределения среднегодовой концентрации загрязнителей по территории. Решение этой задачи весьма сложно, поскольку для описания поведения загрязняющих веществ в нижней атмосфере следует не только учитывать дисперсию их в турбулентном потоке, но и целый ряд сопряженных с этим переносом физических и химических процессов внутри шлейфа, а также процессы адсорбции веществ на каплях воды и твердых аэрозолях, процессы сухого и влажного вымывания загрязнителей и их продуктов из атмосферы и ряд других.

Подробно эти процессы описаны в практическом приложении по оценке риска от систематических выбросов.

Кратко остановимся на математических подходах к прогнозированию среднего-

довых концентраций ЗВ на основании годовой метеорологической информации характеристик региона. Решение этой задачи сводится к интегрированию возможных концентраций в заданной точке пространства  $(x,y)$ , которые могут возникнуть в течение года с учетом вероятности направления и скорости ветра также вероятности реализации определенного из шести характерных классов устойчивости атмосферы при заданной скорости ветра. Поскольку предполагается, пределах сектора М-румбовой розы ветров направление ветра распределено равномерно, то среднегодовая концентрация может быть оценена по формуле:

$$C(x,y) = C(r,\theta) = \sum_{i=1}^L P_{vi} \times \left\{ \sum_{k=1}^6 \left( P_k(U) \times \frac{M \times Q \times \gamma(x/U)}{2 \times \sqrt{2} \times \pi^{3/2} \times U_i \sigma_z} \times f(A, H, \sigma_z) \right) \right\} \quad (7.7)$$

где  $Q$  - мощность источника, кг/с;

$P_{vi}$  - вероятность реализации ветра со скоростью  $U_i$  м/с, в соответствующем секторе М-румбовой схемы;

$P_k(U)$  - вероятность реализации определенного класса устойчивости атмосферы при ветре  $U$  (А - 1, В - 2, ..., F - 6);

$\theta$  - направление ветра в полярных координатах;

$r$  - расстояние от источника загрязнения до точки  $(x,y)$ ;

$\sigma_z$  - характеристика дисперсии по вертикали;

$f(A, H, \sigma_z)$  - функция влияния высоты источника загрязнения (H) и высоты слоя перемешивания (A);

$2\pi/M$  - угловая доля сектора в М-румбовой розе ветров;

$\gamma(x/U) = \gamma(t)$  - функция изменения концентрации по оси шлейфа за счет фотохимических реакций, сухого и влажного осаждения и т.п. в течение времени.

Для случая простой гауссовой модели дисперсии не взаимодействующего вещества:

$$\gamma(x/U) = \gamma(t) = 1$$

$$f(A, H, \sigma_z) = 2 \times \exp(-H^2 / (2\sigma_z^2)) \quad (7.8)$$

Учет влияния перечисленных факторов по более сложным моделям атмосферной дисперсии подробно рассматривается во многих монографиях, например, С.П. Детков, В.П. Детков, В.А. Астахов "Охрана природы нефтегазовых районов", М., Нед 1994 г., 335 стр.

Кроме прямого ингаляционного воздействия ЗВ на человека могут возникать более сложные механизмы негативного воздействия систематических выбросов на здоровье населения, например, через пищевые цепочки. Так в последнее время связи с увеличением кислотности как "сухих", так и "влажных" осадков в ряде европейских стран возникла проблема с резким увеличением растворимых форм тяжелых металлов в почве. Эти процессы в перспективе могут привести к значительному увеличению содержания тяжелых металлов во всех биотических компонентах окружающей среды, что повысит риск употребления в пищу практически всей сельскохозяйственной продукции и воды. Эта проблема за рубежом носит название "химич

кой бомбы замедленного действия". Подходы к оценке такого рода сценариев приведены в практическом приложении.

Следует отметить, что, как для риска систематических воздействий загрязняющих веществ, так и аварийных процессов, поле риска формируется на реальной картографической основе в едином масштабе путем совмещения поля потенциальной опасности с ожидаемым распределением во времени и пространстве субъектов ("групп риска"), а также с учетом их реакции на негативное воздействие.

В заключение данного раздела рассмотрим некоторые особенности построения полей экологического риска. В качестве характерных примеров рассмотрим экосистемы в зоне действия Астраханского газоконденсатного комплекса и зоне действия промысловых объектов Бованенковского газоконденсатного месторождения на полуострове Ямал.

В первом случае территория представлена в основном бурыми полупустынными почвами легкого механического состава и их засоленными аналогами с малым содержанием гумуса 0.3-1.5%, а также аллювиальными почвами в дельте р. Волга. Емкость катионного обмена полупустынных почв весьма незначительна, реакция щелочная. Растительный покров полупустыни небогат по флористическому составу: пустынно-степные и лугово-степные фитоценозы, болотная и галофитная растительность. Основные факторы воздействия со стороны комплекса на прилегающие ландшафты (в конечных формах атмосферных превращений систематических выбросов различных веществ - серная и азотная кислоты) связаны с постепенным закислением почвы, т.е. с изменением ее буферных свойств.

На рис. 67 представлено интегральное распределение выпадения кислотных осадков в разрезе года при эксплуатации I и II-ой очередей АГКК, а на рис. 68 - связанная с этим динамика изменения буферных свойств почвы. Из этих прогнозов видно, что процесс закисления почв развивается в течение весьма продолжительного времени, а устойчивость почв достаточно высока, чтобы выдержать техногенную нагрузку от систематических выбросов комплекса в течение более 50 лет.

Как отмечалось в главе 4, регионы экосистемы Крайнего Севера по своей устойчивости к действию загрязнителей значительно уступают экосистемам средней полосы. При этом большинство растительных сообществ произрастают в зоне сплошных болот, где, как правило, распространены сильно кислые почвы с  $\text{pH} = 3.5 \div 4.5$ . Для этих регионов основным негативным фактором воздействия на экосистему является прямое воздействие загрязняющих веществ на растительный покров, в особенности на наиболее ранимые сообщества: мхи и лишайники. Следует отметить, что именно мхи и лишайники выполняют роль защиты вечной мерзлоты от растепления. Поэтому сход растительности приводит к трехкратному увеличению глубины протаявания, в результате чего значительно интенсифицируются эрозивные процессы деградации природного ландшафта. Поэтому растительный покров вечномерзлых грунтов представляет интерес с инженерной точки зрения, поскольку обеспечивает устойчивость инженерным сооружениям в условиях Крайнего Севера.

Как было показано в главе 4, негативное воздействие на растительный покров окислов азота и продуктов его фотохимических превращений в разной степени угнетает различные виды растительности. Более того экспериментально замечено, что угнетение одних видов растительности зачастую приводит к изменению баланса в растительном сообществе, состоящем из различных видов. В результате увеличивается доля более стойких к загрязнителям растений.

Для прогноза последствий негативного влияния выбросов окислов азота промысловых объектов на территории Бованенковского газоконденсатного месторождения

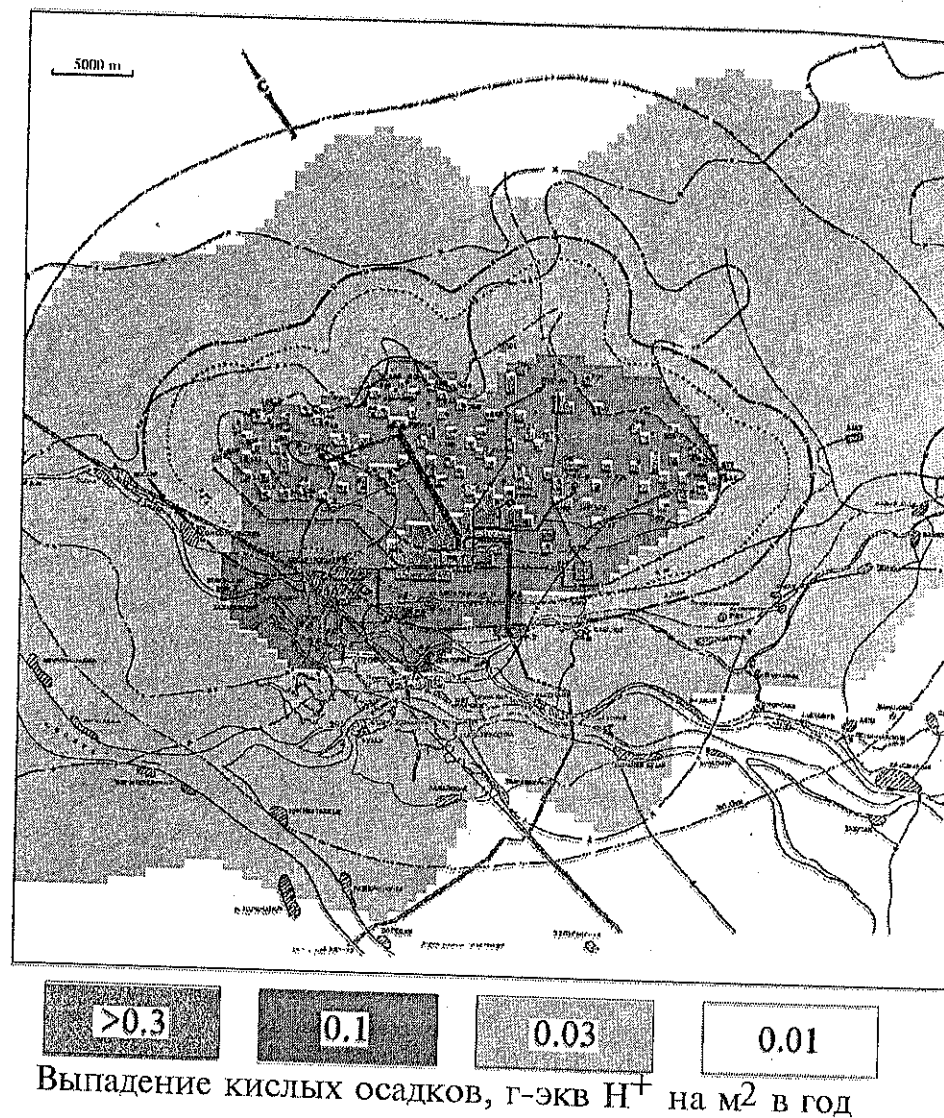


Рис. 67. Интегральное распределение по территории кислотных осадков (сульфаты и нитраты в пересчете на г-эквивалент иона водорода) за годовой период эксплуатации I-й и II-й очереди АГКК.



Таблица 41

Группа растительности	Начало деградации $C_1, \text{мг/м}^3$	Полная гибель $C_2, \text{мг/м}^3$
1. Мхи рода сфагнум, эпифитные лишайники	0.01	0.04
2. Мхи рода дикранум, пометрихум, листовидные лишайники	0.04	0.01
3. Злаковые растения, ягодные кустарники, травы	0.1	0.4

При рассмотрении динамики восстановления растительности более устойчивых видов исходили из следующих предположений:

- в нормальных условиях на единице площади сосуществуют несколько групп растительности с различной долей каждой группы;
- вследствие неодинаковой реакции на неблагоприятное внешнее биохимическое воздействие менее устойчивые виды растений начинают вымирать, происходит замещение их более устойчивыми видами местной флоры;
- при снятии антропогенного воздействия в первую очередь происходит восстановление тех видов, которые доминировали в данном месте в естественных условиях;
- скорость процесса восстановления на новой видовой основе при прочих равных условиях прямо пропорциональна площади, не занятой растительными сообществами.

Динамика восстановления растительного покрова описывалась нами на основе сделанных предположений в следующем виде:

$$\begin{aligned} dS_1/dt &= k_1 * S && \text{если } C < 0,01 \text{ мг/м}^3 \\ dS_2/dt &= k_2 * S - dS_1/dt && \text{если } C < 0,04 \text{ мг/м}^3 \\ dS_3/dt &= k_3 * S - dS_1/dt - dS_2/dt && \text{если } C < 0,10 \text{ мг/м}^3 \end{aligned}$$

$S$  - доля незанятой растительными сообществами площади,  
 $dS_1/dt$  - изменение доли площади, занятой 1 группой,  
 $dS_2/dt$  - изменение доли площади, занятой 2 группой,  
 $dS_3/dt$  - изменение доли площади, занятой 3 группой,  
 $k_1, k_2, k_3$  - скорости зарастания.

Скорости зарастания были оценены как 0.125, 0.1, 0.083 1/год соответственно, что предполагает использование определенных методов стимулирования роста растительности на нарушенных ландшафтах.

На рис. 70 представлена динамика изменения растительных сообществ на территории ГКМ с учетом поэтапности ввода промышленных объектов. На рис. 71 приведена последовательность распределений доли схода растительности в различные моменты времени. Видно, что прямое воздействие на растительные сообщества наиболее сильно сказывается непосредственно в начале ввода в эксплуатацию про-

мышленного объекта, поскольку именно в этот момент биоценоз выводится из состояния динамического равновесия.

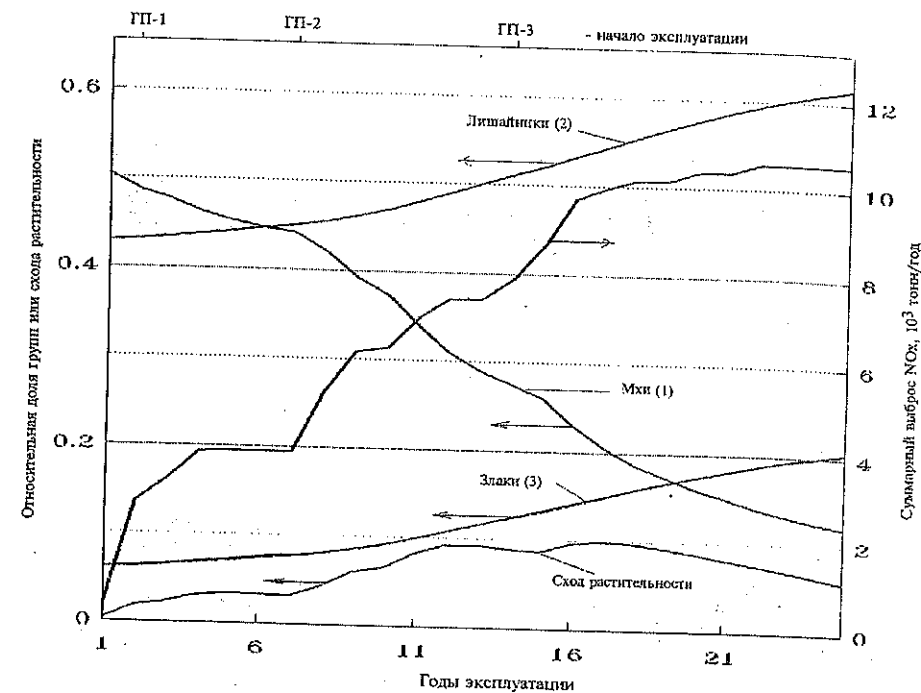
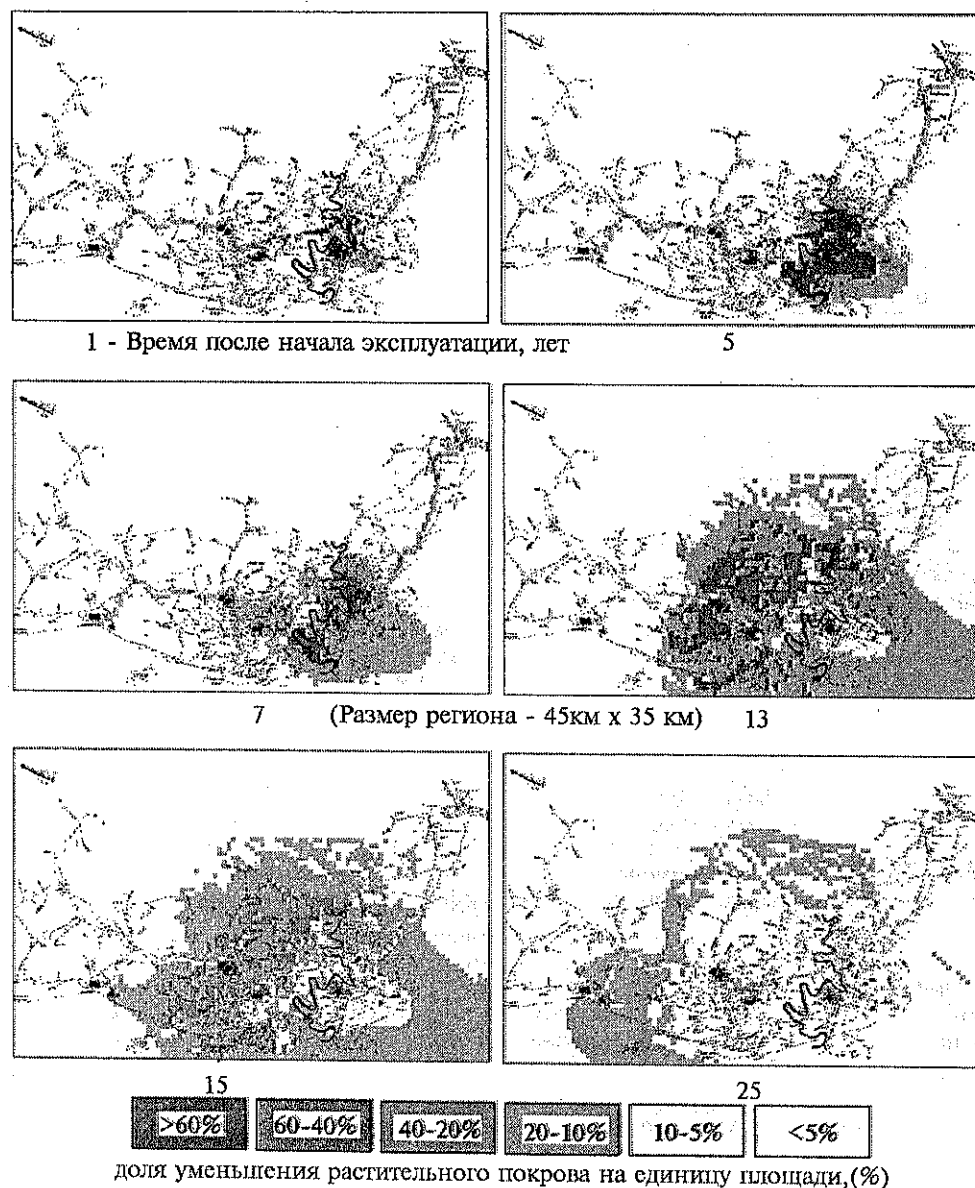


Рис. 70. Динамика изменения групп растительности на Бованенковском ГКМ в результате загрязнения атмосферы оксидами азота.

Принятый подход позволяет, в принципе, разработать универсальный методический алгоритм оценки профессионального, антропогенного и экологического риска и на его основе провести обоснование и детализацию единой системы экспертизы различных объектов, а получаемая при этом информация может стать основой для принятия решений по правовому, административно-техническому и экономическому регулированию и управлению риском как на предприятиях, так и в регионе целом.

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ РИСКА ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСК



**Рис. 71.** Динамика схода и восстановления (на новой основе) растительного покрова на территории Бованенковского ГКМ по мере его освоения

Полученные на предыдущих этапах результаты необходимы для проведения анализа показателей безопасности в регионе. Предлагаемая методология количественно отвечает на вопрос: "Какому риску подвергается население региона в связи с промышленной деятельностью". В качестве такого критерия выступает формальный показатель суммарного риска ( $F$ ) для всего населения ( $N$ ). При этом на основе поля риска  $R_{\Sigma}^*(x,y)$  можно и необходимо выделить из всего населения только группу  $N^*$ , которая потенциально может быть подвержена опасности. Эта группа риска также может быть проранжирована по уровню потенциального риска, построена зависимость (гистограмма) распределения субъектов по уровням риска  $N(R)$ .

Решение о допустимости уровня риска, как правило, принимают исходя из среднего значения индивидуального риска для субъекта:

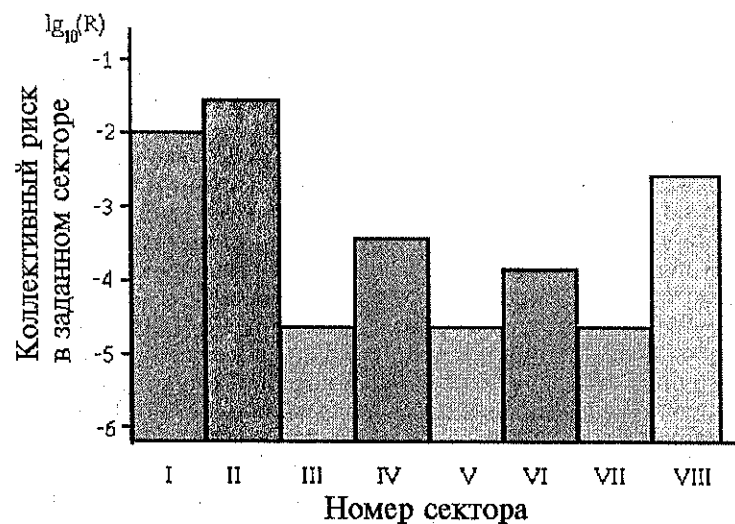
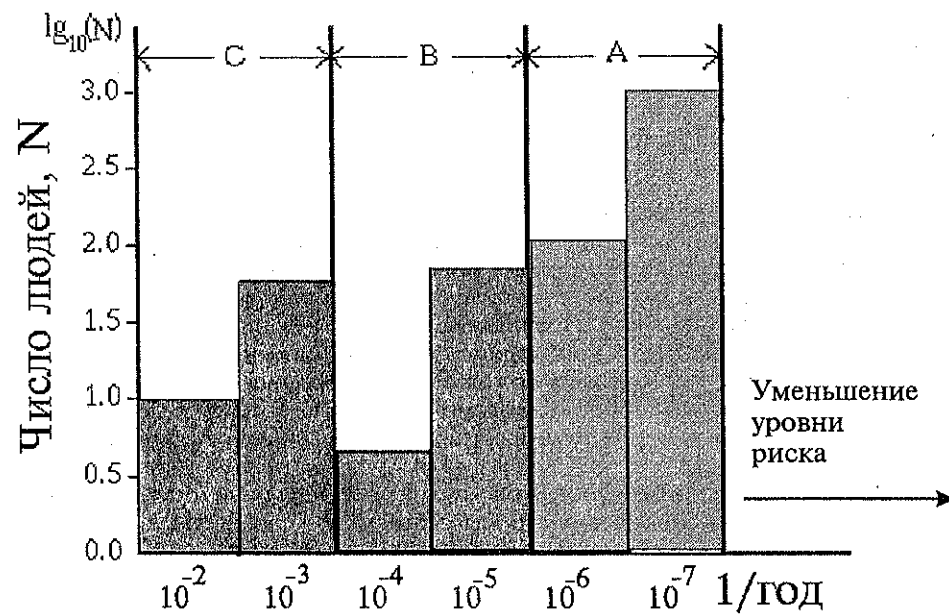
$$IR^{av} = F/N^* \quad (8.1)$$

Важно отметить, что деление суммарного риска на все население региона приводит к значительному занижению этого показателя. Поэтому определение реальной группы риска ( $N^*$ ) является весьма важным для получения объективных интегральных показателей.

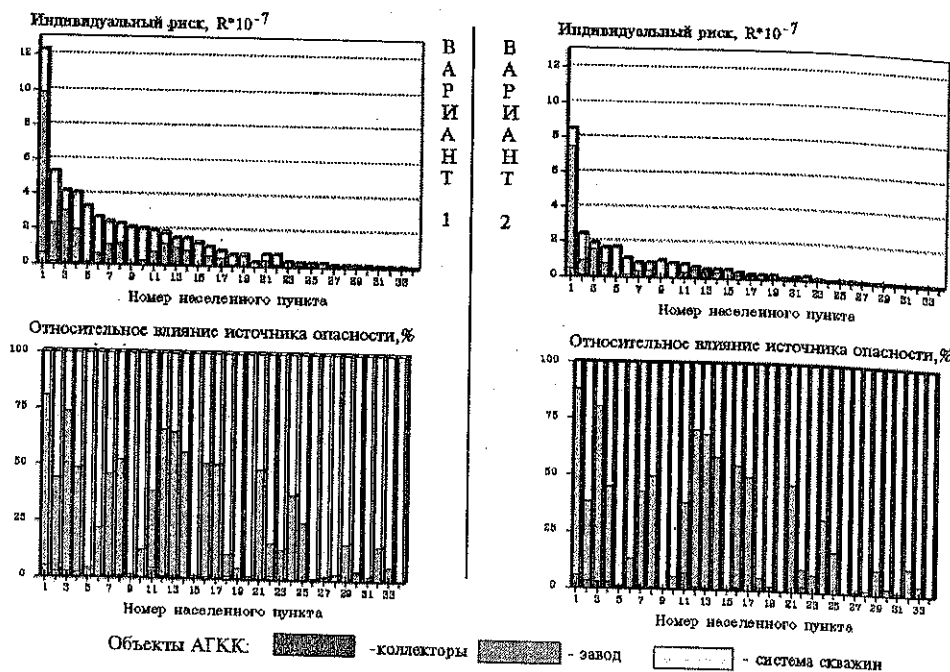
В том случае, когда в качестве критерия принимается утверждение, что "ни один человек из группы риска не может подвергаться уровню риска выше порогового ( $R_n$ )", то ответ на этот вопрос дает только рассмотрение N-R диаграммы - рис.72, (по данным рис.61 гл.VII).

Следующий этап анализа риска состоит в том, что на практике население региона проживает компактными группами (квартал, поселок, деревня и т.п.) и распределено неравномерно по всей территории анализируемого региона. В этом случае необходимо провести выделение этих групп в самостоятельные подгруппы риска и оценить для каждой подгруппы параметры  $IR^{av}_k$ ,  $F_k$ ,  $N_k$ , а также дать зависимость  $N_k(R)$ . Эта процедура позволяет проранжировать население региона по степени риска  $IR^{av}_k$  в зависимости от территории проживания подгруппы. На основании этой информации выбираются конкретные поселки, районы, кварталы - уровень риска которых сравним или превышает пороговый ( $R_n$ ). В качестве характерного примера на рис. 74,75 представлена информация о распределении риска по 33 населенным пунктам Астраханского ГКК.

Вопрос об уровне приемлемого риска является наиболее важным в принятии решений. Следует подчеркнуть, что выбор значения приемлемого уровня индивидуального риска во многом зависит от экономического состояния страны. Так в Нидерландах в 1985 г. концепция "приемлемого риска" была принята в качестве государственного закона. По этому закону вероятность смерти для населения от опасностей, связанных с техносферой, считается недопустимой, если составляет в год более  $10^{-6}$ , и приемлемой - если эта величина меньше  $10^{-8}$ . Решение по объектам, инди



**Рис. 73.** Распределение коллективного (интегрального) риска по секторам вокруг источника опасности (см. рис. 61)



**Рис. 74.** Распределение населенных пунктов по уровням индивидуального риска и вклад различных объектов АГКК в интегральные показатели риска.



**Рис. 75.** Распределение суммарного риска для населения 10-км зоны АГКК для двух вариантов поведения при ЧС (1- неадекватный, 2- планируемый).



видуальный уровень риска которых лежит в интервале  $10^{-6}..10^{-8}$ , принимается исходя из конкретных экономических и социальных аспектов. В других странах масштабы использования концепции "приемлемого риска" в законодательстве более ограничены, чем в Нидерландах, но во всех промышленно развитых странах уже существует понимание необходимости более полного применения такого подхода (концепции "приемлемого риска"), как одного из наиболее эффективных механизмов управления промышленной безопасностью.

С целью обоснования границ "приемлемого риска" приведем результаты исследования И.Б.Евстафьева, выполненного по государственной программе уничтожения химического оружия и опубликованного в сборнике "Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях," вып.3, 1992, стр.2-15. Автором были проанализированы статистические данные по различным авариям техногенного характера и чрезвычайным ситуациям за период 1987 - 1991 годов, результаты которых с позиций индивидуального риска приведены в табл.42.

В любом районе страны, независимо от того, есть там какие-либо техногенные объекты или нет существует некоторая вероятность того, что человек погибнет в результате несчастного случая, преступления или другого "неестественного события". Эта категория так и называется в статистике: "смерть от неестественных причин". Очевидно, что вероятность смерти возрастает, если в районе проживания человека фиксируются некоторые факторы, тем или иным путем негативно воздействующие на здоровье человека. Поэтому индивидуальный среднестатистический риск от техногенной деятельности сравнивается в табл.42 именно с этой категорией.

Таблица 42.

Событие	Вероятность смерти в год
Смерть от неестественных причин - в бывшем СССР (1987 г.) - Российская Федерация (1987 г.)	$1.1 \times 10^{-3}$ $(1.0-1.7) \times 10^{-3}$
Гибель в происшествиях с подвижным составом (1988 г.)	$1.6 \times 10^{-4}$
Убийство или самоубийство - в бывшем СССР (1991 г.) - Российская Федерация (1991 г.)	$1.6 \times 10^{-4}$ $2.6 \times 10^{-4}$
Риск в дорожно-транспортных происшествиях в Московской обл. (1991г)	$2.7 \times 10^{-4}$
Риск гибели в результате умышленного убийства в Московской обл. (1991 г.)	$7.0 \times 10^{-5}$
Верхняя оценка поражения персонала техногенных объектов	$1.9 \times 10^{-5}$
Верхняя оценка гибели населения в результате природного чрезвычайного события (1989 г.)	$1.2 \times 10^{-4}$
Верхняя оценка гибели населения в результате техногенного чрезвычайного события (1989 г.)	$2.4 \times 10^{-4}$
Гибель в авиационной катастрофе при полетах на самолетах Аэрофлота	$8.0 \times 10^{-7}$
Гибель в авиационной катастрофе при полетах на самолетах "Боинг"	$4.3 \times 10^{-7}$

Анализ материалов этой таблицы показывает, что для территории Российской Федерации уровень риска (смерть от неестественных причин) близок к  $10^{-3}$ , что на 5 порядков выше установленного на Западе нормативного уровня. Однозначно, ориентироваться на фоновый уровень, близкий к  $10^{-3}$ , не следует. Характерно, что в ряде конкретных районов этот уровень еще выше. В то же время верхняя оценка фоновой оценки гибели населения вследствие техногенных чрезвычайных событий составляет от  $2 \times 10^{-5}$  (1989г.) до  $5 \times 10^{-4}$  (1990 г.).

Исходя из этих данных, следует, что риск гибели населения выше  $5 \times 10^{-5}$  дол. рассматриваться как неприемлемый. Отметим, что в ряде отечественных ГОСТов пожарной опасности в качестве приемлемого уровня как для персонала, так и населения заложен уровень  $1 \times 10^{-6}$ . Видимо, этот показатель более характерен для Запада, чем для условий нашей страны. Анализ всех приведенных материалов показывает, что для территории нашей страны фоновый уровень риска фактически близок значению  $5 \times 10^{-6}$ .

Кроме того по мнению И.Б.Евстафьева представляется целесообразным выделить несколько уровней, на которых может быть оценен фоновый риск:

- мировой;
- национальный (уровень страны);
- региональный.

Отметим, что однозначной зависимости между этими уровнями нет и уровень регионального фоновой риска может как превышать, так и быть ниже риска, оцененного на мировом уровне.

При разработке проектов, потенциально опасных для населения, уровень риска целесообразно сравнивать именно с минимальным уровнем фоновой оценки риска, поскольку недопустимо создавать какой-либо объект лишь на том основании, что его уровень ниже регионального, в то время как этот уровень значительно превышает национальный уровень риска.

Проводя сравнение рисков, связанных с промышленной деятельностью, с повседневными бытовыми рисками следует помнить, что одни опасности принимаются обществом добровольно, например, езда на автомобиле, а другие нет. Весьма важно, что вопрос о восприятии риска существенно зависит от тех реальных выгод, которые дает та или иная деятельность. В качестве иллюстраций на рис. 76 представлены зарубежные характеристики восприятия людьми различных рисков в системе "затраты-выгоды".

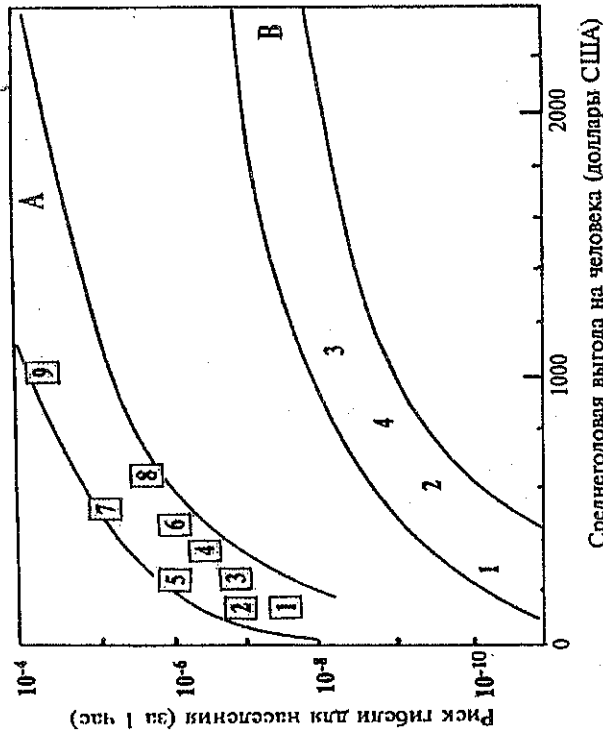
Если на предыдущих стадиях анализа определено, что уровень риска для районов региона превышает допустимые значения, то проводится вычисление социальной значимости риска для населения в терминах суммарного экономического ущерба от гибели, травмирования людей и материальных потерь в результате чрезвычайных ситуаций.

Как было показано ранее, экономический эквивалент социального ущерба линейно связан со степенью риска:

$$ESC = \sum_i C_i \cdot N_i, \quad (1.2 < p < 2) \quad (8.2)$$

$N_i$  = количество смертельных исходов при реализации аварийного сценария  
 $C_i$  = вероятность негативных последствий при реализации аварийного сценария  $i$ .

А - "добровольный" риск (занятия активной деятельностью):  
 1 - железнодорожный проезд (перевозки); 2 - год контрактной службы в армии; 3 - курение; 4 - охота, горные лыжи; 5 - езда на автомобиле; 6 - заболевание; 7 - участие в боевых действиях (Вьетнам); 8 - коммерческая авиация; 9 - авиация общего назначения;



В - "недобровольный" риск (экспозиция внешней опасности):

1 - природные катастрофы; 2 - морской терминал СПГ в США (Los Angeles); 3 - морской терминал СПГ в Нидерландах (River Mass); 4 - ЛЭП высокого напряжения

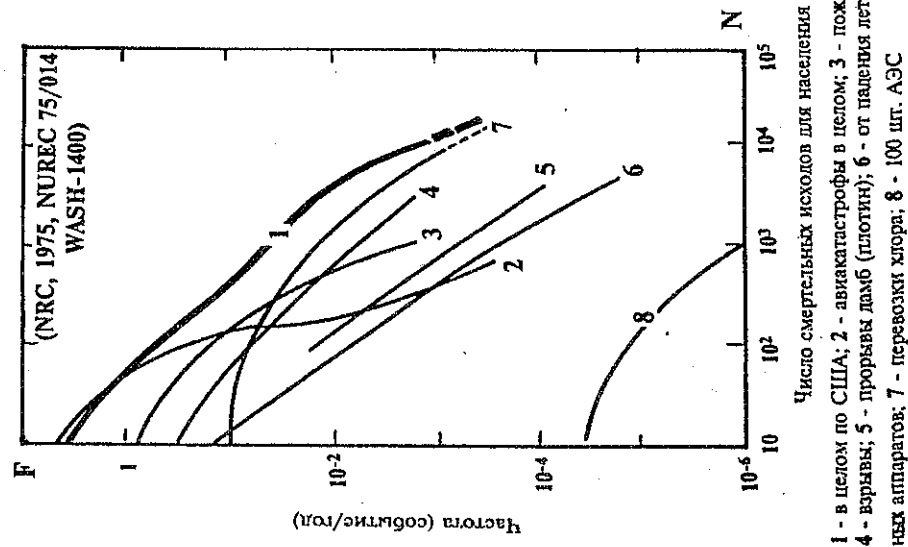


Рис. 76. Различные варианты сравнения рисков: А - система "затраты-выгода"; В - FN-диаграмма.

Согласно современным представлениям ("Обоснование затрат, выделяемых на предотвращение гибели людей при несчастных случаях, авариях, катастрофах, стихийных бедствиях", Г.Х.Харисов - Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, вып.8, 1993, стр.73) мероприятия по обеспечению безопасности людей производятся исходя из предположения, что в случае смерти человека экономический ущерб составит сумму, равную экономическому эквиваленту человеческой жизни. Экономический эквивалент ущерба в результате травмирования обычно принимается равным 0.1 от экономического эквивалента человеческой жизни. С учетом этого, а также с учетом модели пропорционального снижения риска одновременной гибели человека получено выражение для вычисления математического ожидания экономического ущерба от гибели и травмирования людей в виде:

$$M(Y) = 2 \times (R \times N)^2 / R^* \times \Delta(T_{ж}) \quad (8.3)$$

где  $R^*$  - приемлемый уровень риска,  $R$  - вероятность несчастного случая гибели человека одновременно,  $\Delta(T_{ж})$  - экономический эквивалент человеческой жизни. В общем случае экономический эквивалент зависит от возраста человека

$$\Delta(t_x) = \Delta_0 \cdot e^{-\frac{(t_x - c)^b}{a}}$$

$$\Delta_0 = \Delta(T_{ж}) / e^{-\frac{(T_{ж} - c)^b}{a}} \quad (8.4)$$

где  $\Delta_0$  - экономический эквивалент жизни новорожденного;  $\Delta(T_{ж})$  - экономический эквивалент жизни среднестатистического человека в возрасте  $t_x$ ,  $T_{ж}$  - средний возраст живущих людей;  $a = 37.36$ ;  $b = 1.5$ ;  $c = 0$  - параметры распределения живущих людей в СССР на 1985-1988 гг.

Так на 1985-1988 гг.  $\Delta_0$  составило в рублях - 379000 руб. или 1890 т пшеницы

Согласно отмеченным выше положениям, для расчета экономического ущерба в качестве реально существующего уровня фонового (допустимого) риска принимается значение  $10^{-5}$  смертей/год. Следует подчеркнуть, что зарубежные значения эквивалента как правило значительно выше и, например, для США составляют на сентябрь от 2 до 4 млн. долларов при уровне допустимого риска не выше  $10^{-6}$ . Поскольку расчеты суммарных затрат следует учитывать уровень индивидуального риска для населенных пунктов (групп риска,  $N_k$ ).

Для оценки суммарных компенсационных затрат  $M(Y)$  для всего региона в качестве нижней оценки можно сделать предположение, что в случае аварии может погибнуть не более 1 человека. Тогда формула для вычисления экономического ущерба преобразуется к виду:

$$M(Y) = \sum_{k=1}^K N_k \times 2 \times (R_k^{\alpha})^2 / R^* \times \Delta(T_{ж}) \quad (8.5)$$

Зная  $M_k(Y)$  для каждой группы риска  $N_k$ , можно проранжировать эти группы по объему компенсационных затрат на проживание в зоне повышенного риска.

Поскольку принятие решений в области обеспечения безопасности базируется прежде всего на выборе альтернатив вложения ограниченных ресурсов и средств, то этот выбор может быть обоснован анализом матрицы рисков в зависимости



общего количества источников риска ( $J$ ). Матрица влияния различных объектов на группы риска ( $N_j$ ) строится по параметрам вклада каждого источника в интегральные показатели суммарного ( $F(k,j)$ ,  $j=1,J$ ,  $k=1,K$ ) или среднего индивидуального риска ( $IR^{av}(k,j)$ ,  $j=1,J$ ,  $k=1,K$ ).

В результате анализа этих матриц выбираются те потенциально опасные объекты, вклад в риск которых максимален.

После выбора альтернативных объектов анализу подвергаются показатели риска для различных сценариев ( $I$ ). При этом следует учитывать как значения интегральных показателей риска для каждого сценария, так и масштабы самих аварийных процессов. Как показали исследования зарубежных авторов (Lees), вероятность одновременной гибели нескольких человек ( $FN$  - диаграмма) уменьшается и может быть описана зависимостью типа (рис.71):

$$\ln(F) \cong F_0 - \ln(N) \quad (8.6)$$

Поэтому значимость того или иного сценария развития аварии можно в первом приближении оценивать площадью эффективного летального факела (делается предположение, что плотность распределения людей в окрестности источника опасности является величиной постоянной). Площадь эффективного летального факела определяется из рассчитанных ранее полей потенциальной опасности:

$$S_{\text{эф}} = \int_S R_M(x,y) dS \quad (8.7)$$

Эта величина может использоваться в оценке относительного экономического ущерба от аварий, поскольку  $S_{\text{эф}} \sim N$  (числу пострадавших).

В данном случае под сценарием аварии рассматриваются все исходы, связанные с первоначальным выбросом опасного вещества в окружающую среду.

Имея набор вероятности  $\lambda_i$  реализации аварийных сценариев с  $S_{\text{эф}}(i)$ , можно для подробного анализа причин аварии выбрать сценарии с максимальным вкладом в риск.

Принятие решения о снижении риска может идти по нескольким направлениям:

#### 1. Снижение вероятности возникновения аварии.

Очевидно, что этот фактор определяется надежностью технологического оборудования, возможностью контроля и поддержания его ресурса, а также эффективностью управления технологическим процессом.

При этом крайне важным является исследование закономерностей возникновения крупномасштабных аварийных отказов из первичных отказов отдельных элементов системы с учетом конкретной технологической специфики объекта. Как уже отмечалось, в мировой практике для этой цели, как правило, используются методики построения "деревьев отказов" и соответствующие программные комплексы, позволяющие исследовать неоднозначное влияние различных факторов (физико-химические характеристики материалов, технологии, системы контроля и управления, человеческий фактор и т.п.) на объективные предпосылки и частоту возникновения аварий различных типов. Построение указанных логических схем позволяет также определить наиболее эффективные средства и методы либо полного блокирования отдельных "цепочек" возникновения аварий, либо уменьшения их вклада в интегральное значение вероятности аварии.

2. Уменьшение масштабов и (или) направлений распространения физических последствий воздействия от аварии в окружающем пространстве.

Как показывает практика, эффективность этих действий в значительной мере зависит от правильного понимания и возможностей достоверного прогноза физических эффектов, связанных с авариями, а также сценариев их развития и масштабов воздействия на окружающую среду. Уровень материальных затрат на снижение масштабов распространения полей физического воздействия на окружающую среду должен в обязательном порядке увязываться по мере своей значимости с общей стратегией уменьшения риска для рассматриваемой группы воздействия.

#### 3. Уменьшение масштабов поражения ( $S_{\text{эф}}$ ).

В первую очередь речь идет о поражении людей, т.е. технического персонала населения. При этом важным являются следующие основные моменты: во-первых, правильное понимание специфики поражающих факторов в конкретной аварийной ситуации; во-вторых, соответствующая подготовленность персонала и населения адекватным действиям в условиях чрезвычайных ситуаций, наличие индивидуальных средств защиты или укрытий при работе в зонах потенциальной опасности; в-третьих, частичное изменение механизма поражения, например, за счет готовности оказать экстренную медицинскую помощь пострадавшим.

Наконец, одним из направлений снижения риска является выведение субъекта воздействия из зоны негативного влияния при его перемещении относительно опасного объекта на безопасное расстояние. Самостоятельно (по крайней мере на стадии проектирования) может рассматриваться задача об оптимальном пространственном положении групп субъектов и объектов из условий минимизации интегрального риска системы в целом.

Как уже отмечалось, риск можно характеризовать, как математическое ожидание ущерба определенного рода в течение определенного периода времени:

$$R = w * E$$

$R$  - риск, ущерб/год;

$w$  - частота возникновения аварийных ситуаций, авария/год;

$E$  - количественная характеристика ущерба (смерть людей, выведение людей из оборота, разрушение зданий и конструкций и т.п.)

В зависимости от целевой функции интегральный экономический ущерб ( $S$ ) потенциальных аварий на технологических объектах системы может быть описан как сумма рисков на отдельных объектах:

$$S = \sum_{i=1}^N k_i * R_i$$

где  $k_i$  - коэффициент экономического соответствия натурального ущерба  $R_i$  - риск последствий для  $i$ -го объекта.

Рассматривая возможные альтернативные варианты снижения риска с экономической точки зрения, следует оценивать стоимость каждого из них ( $M$ ). Критерий выбора альтернативы можно определить как минимум суммарной стоимости ( $Z$ ) з

трат на снижение риска экономических последствий аварий, которая определяется:

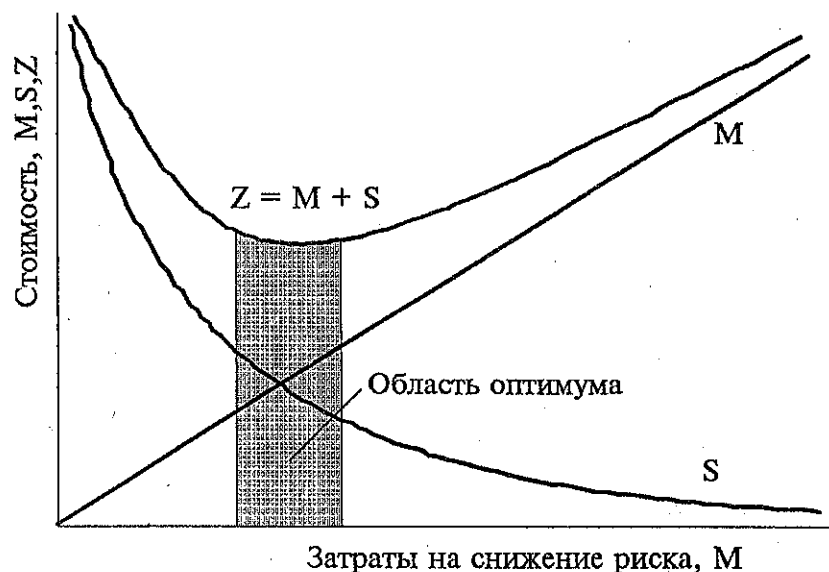
$$Z = M + S$$

В общем случае с увеличением затрат на снижение риска функция (S) уменьшается, как это показано на рис. 77. Поэтому, исходя из принципа равновесия в управлении риском, в области оптимальных затрат выполняется равенство

$$M \approx S$$

Поскольку зависимость  $S(M)$  для различных путей уменьшения риска различается значительно, то при известном значении риска предпочтение отдается варианту, для которого значение функции (Z) минимально по сравнению с другими.

Поясним сказанное на следующем примере.



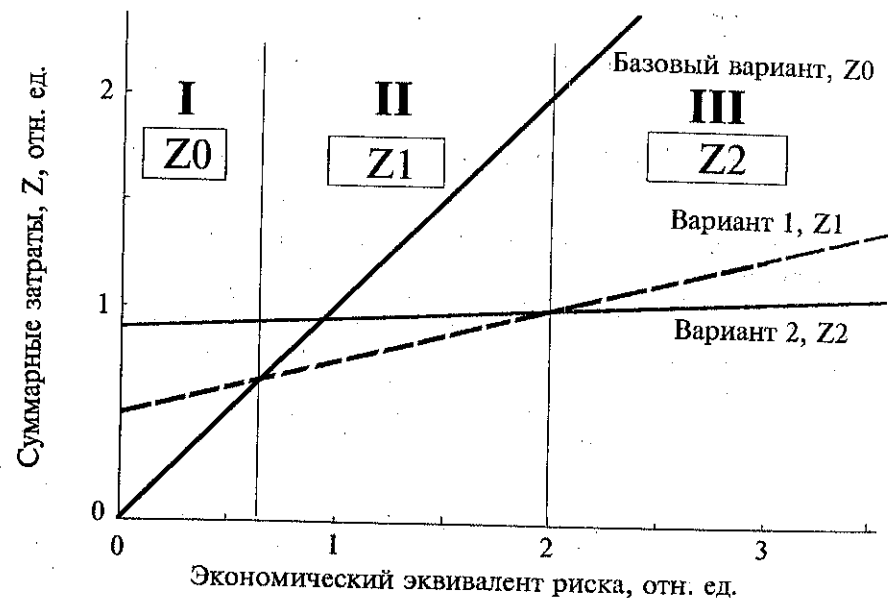
**Рис. 77.** Зависимость суммарных затрат (Z) на уменьшение риска: S - экономический эквивалент ущерба, M - затраты на снижение риска.

Пусть рассматривается три варианта: базовый вариант (Z0) с относительной стоимостью, равной 1, и два варианта уменьшения риска. Ниже представлены соответствующие характеристики этих вариантов:

Номер варианта	M	S	Z
0	0	1	1
1	0.5	0.25	0.75
2	0.9	0.05	0.95

Как видно из характеристик, при известном уровне риска выбор из трех альтернатив: 0 - ничего не изменять, 1 - улучшения средней эффективности, 2 - улучшения высокой эффективности, предпочтителен для варианта (1) мероприятий по снижению риска. Этот вариант, хотя и снижает риск в 4 раза, а не в 20 раз, как вариант имеет относительно невысокую исходную стоимость затрат (0.75 по сравнению с 0 для варианта 2).

К сожалению, на практике примеры такого рода встречаются крайне редко, поскольку зачастую риск распределен в некотором интервале и может изменяться со временем, т.е. значение функции (S) изменяется в некотором интервале. В таких случаях выбор вариантов графически можно представить в виде трех областей, каждой из которых в зависимости от уровня риска выбирается определенный вариант (рис. 78). Как видно из рисунка 78 в зависимости от уровня риска можно выделить те области, для которых предпочтителен выбор той или иной стратегии. Так первой области выбирается базовый вариант, во второй - первый вариант, а третьей - второй вариант.



**Рис. 78.** Зависимость суммарных затрат от уровня риска.

В общем виде риск негативных последствий распределен в определенном интервале в соответствии с функцией распределения  $p(S)$ . В этом случае можно выявить относительный вес принятия какой-либо стратегии (рис.1.3). Относительный вес определяется как доля распределения  $p(S)$ , находящаяся в зоне приоритетного выбора определенной стратегии. Так для рассматриваемого случая трех вариантов можно сделать следующие выводы: базовый вариант проходит в 17% случаев, вариант 1 - в 55%, вариант 2 - в 28%.

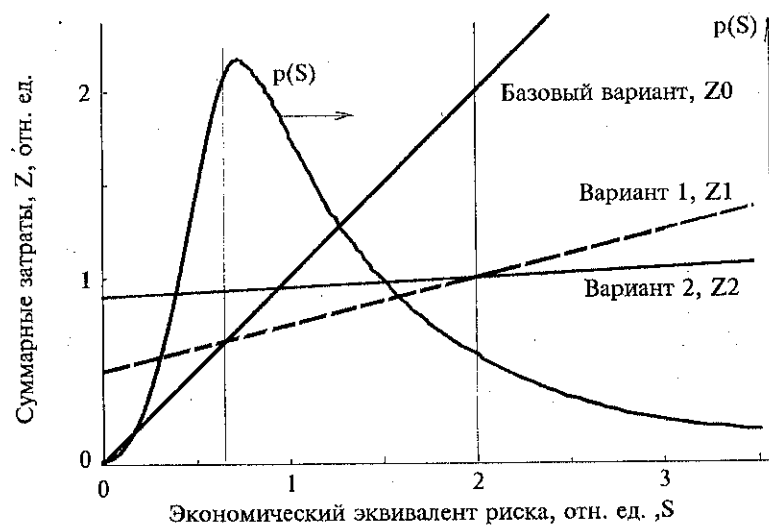


Рис. 79. Выбор стратегии с учетом распределения риска,  $p(S)$

Таким образом, охарактеризовав эффективность действия тех или иных мероприятий по снижению риска, и имея распределение уровней риска в экономических эквивалентах, можно оценить применимость и значимость вариантов мероприятий, обеспечив тем самым оптимальное управление риском на технологических объектах.

Переход от натуральных ущербов к их экономическим эквивалентам на сегодня представляет весьма сложную задачу, поскольку в ряде случаев отсутствуют нормативные показатели платы за причиненный ущерб. Как показывает практика, приводимые статистические данные о потерях отражают лишь прямые потери, такие как стоимость основных фондов, продуктов производства. Подобное положение характерно не только в нашей стране, но и за рубежом. Так по расчетам американских исследователей прямые потери от аварии на атомной станции "Три-Майл-Айленд" оцениваются немногим более 1 млрд. долларов. В тоже время совокупные издержки по АЭС составили колоссальную величину - 130 млрд. долл., которые складываются из увеличения сроков сооружения АЭС с 9 до 13 лет (55 млрд. долл.), установки новых систем контроля, безопасности и переподготовки персонала на всех АЭС (38 млрд. долл.), модернизации реакторов (11 млрд. долл.) и прочих расходов, включая компенсационные выплаты (26 млрд. долл.). Отметим, что ущерб от аналогичной

аварии на Чернобыльской АЭС оценивается у нас в пересчете по официальному курсу валют на уровне 400 млн. долл.

Важность проблем, связанных с оценкой экономического эквивалента риска часто обсуждается исследователями разных стран. Так по мнению ученых "Форп" по геологоразведке и добыче к экономическим потерям следует относить:

- потери запасов
- нанесение травм людям
- ущерб оборудованию и имуществу
- остановка производства или перебои в производственном процессе
- ущерб окружающей среде
- потери капитала, ухудшение экономической конъюнктуры.

Было установлено, что в области нефтегазовой промышленности прямые потери (ущерб имуществу и потеря рабочих дней) находятся с реальными расходами потерь в соотношении 1 : 30 (рис.1.4). Это обстоятельство определяет во многом изменение стратегии поведения в отношении к вопросам безопасности для большинства зарубежных фирм, работающих в области нефтегазового комплекса.

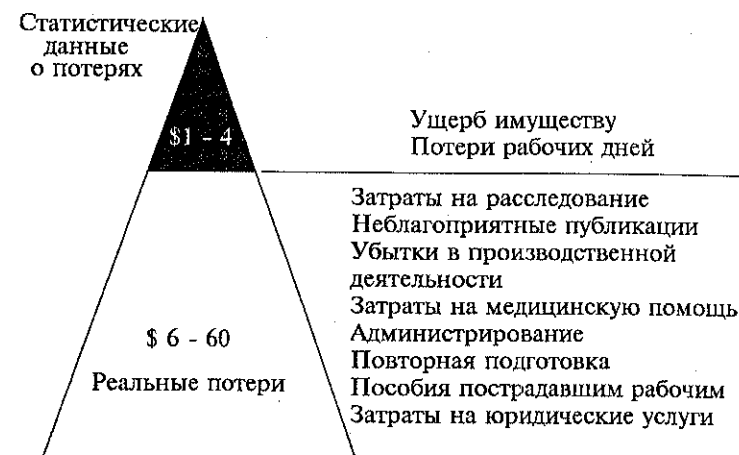


Рис. 80. Соотношение прямых и реальных потерь от аварий

Наиболее полно спектр экономических потерь при авариях описан в раб. "Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon-Chemical Industries. A Thirty-Year Review", Fourteenth Edition, Marsh&McLennan, M&M Protection Consultants, 1992. В данном исследовании проанализированы 170 аварий с максимальными экономическими потерями за тридцатилетний период вплоть до 1991 года, происшедших в области индустрии добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья. Суммарные экономические потери от 170 аварий составили \$7.35 млрд. долл. в цен. 1991 г. Ранжирование аварий по уровню потерь, представлено в табл.43. Видно, что первая группа аварий (20% от общего числа) дают 55% вклада в суммарный ущерб.

### Распределение экономических потерь.

Таблица 43.

Доля группы %	Миллионы долларов, \$			
	Максимум	Минимум	Общие	Среднее
81-100%	\$715.0	\$59.2	\$4149.7	\$122.1
61-80%	59.0	28.6	1418.2	41.7
41-60%	27.8	18.3	788.7	23.2
21-40%	17.9	14.4	558.1	16.4
0-20%	14.4	10.8	433.4	12.8

Динамика аварий и потерь от них за пятилетний интервал представлена в табл.44. По сравнению с 1961 г. количество крупных аварий возросло примерно в три раза, а экономический ущерб от них в ~9 раз.

### Динамика аварий и их экономического ущерба.

Таблица 44.

Годы	1962-66	1967-71	1972-76	1977-81	1982-86	1987-91
Количество аварий	11	17	26	39	36	41
Суммарные потери, млрд. \$	0.34	0.49	0.75	1.60	1.23	2.94

Распределение крупных аварий по типам промышленных предприятий представлено в табл.45, а по типам аварийных процессов в табл.46-47.

### Распределение экономических потерь от крупных аварий на различных предприятиях.

Таблица 45.

Предприятие	Доля потерь, %	Средний ущерб от аварии, млн. \$
Нефтеперерабатывающие заводы	40	44.6
Нефтехимические заводы	35	47.0
Терминалы	11	28.1
Газоперерабатывающие заводы	6	55.5
Прочие объекты	8	31.4

### Распределение экономических потерь по типам аварийных процессов

Таблица 46.

Тип аварии	Процент ущерба	Суммарное количество	Средний ущерб на аварию, млн. \$
Пожары	36%	62	\$36.1
Взрывы облаков	35%	59	\$59.6
Взрывы	25%	43	\$33.6
Другие	4%	6	\$24.7
Итого	100%	170	\$43.2

### Распределение экономических потерь по типам аварий на различных предприятиях.

Таблица 47.

Предприятие	Взрывы	Пожары	Взрывы облаков	Другие
Нефтеперерабатывающие заводы	15%	48%	31%	6%
Нефтехимические заводы	46%	17%	37%	0%
Терминалы	22%	44%	28%	6%
Газоперерабатывающие заводы	0%	40%	60%	0%
Прочие объекты	7%	50%	36%	7%

Из 170 аварий 123 произошли во время нормальной работы предприятий, аварии - в период остановки, пуска-наладки или ремонта. При этом средний ущерб от аварий при нормальном эксплуатационном режиме в 1.5 раза меньше по сравнению с авариями в период остановки или ввода предприятия.

Распределение аварий по причинам их возникновения дано в табл.48, типам оборудования, на котором возник аварийный отказ, в табл.49.

### Распределение экономических потерь по причинам возникновения аварий.

Таблица 48.

Причина аварии	Процент потерь	Средний ущерб, млн.
Механическое разрушение	41%	39.0
Ошибка эксплуатации	20%	51.8
Неизвестная причина	18%	38.6
Нарушение процесса	8%	51.1
Природные катастрофы	6%	45.4
Ошибка проекта	4%	57.6
Саботаж/Поджог	3%	26.2

### Распределение экономических потерь по типам оборудования, на котором произошел аварийный отказ.

Таблица 49.

Тип оборудования	Процент потерь, %	Средний ущерб, млн.
Трубопроводы	29%	47.6
Резервуары, танки	16%	42.7
Реакторы	13%	67.9
Другие установки	8%	27.3
Технологические барабаны	7%	26.1
Морские суда	4%	35.5
Неизвестное оборудование	7%	39.6
Насосы-компрессоры	6%	29.1
Теплообменники	4%	23.8
Технологические колонны	4%	58.5
Нагревательные котлы	2%	18.6

Характеристика источников зажигания при возникновении аварии со взрывами или пожарами приведена в табл.50.

**Распределение экономических потерь по типам источников зажигания.**

Таблица 50.

Источник зажигания	Процент потерь, %	Средний ущерб, млн. \$
Неизвестный	54	52.2
Открытое пламя	11	36.9
Химическая реакция	7	28.0
Электрическое оборудование	5	17.9
Двигатель внутреннего сгорания	4	46.4
Самозагорание	5	42.1
Молния	3	38.8
Горячая поверхность	3	36.9
Без зажигания	3	28.6
Саботаж/Поджог	2	23.2
Электростатика	2	23.6
Резка/Сварка	1	11.9

Приведенные выше сведения широко используются западными страховыми фирмами в процессе управления экономическими рисками.

Представленная выше общая методика и информационная база ставит своей целью проведение комплексного анализа и управления риском в рамках отдельного предприятия или транспортной системы.

Следует учитывать, что стратегия управления риском не является однозначной и во многом зависит от общего состояния, приоритетов и тенденций развития экономики страны, от существующей законодательной и нормативной базы, отлаженности механизмов экономического и правового управления проблемами безопасности и охраны окружающей среды в промышленности и ряда других факторов.

Фундаментальные исследования этой проблемы в масштабах социально-экономической формации в целом были проведены И.И.Кузьминым (докт. диссертация "Риск и безопасность: концепция, методология, методы", Москва, 1993). При этом в качестве основного критерия управления риском был использован показатель стоимости продления жизни населения. Соответствующие показатели для различных стран представлены в табл.51.

Таблица

Страны, 1985 г.	Личное потребление, \$долл./год	ВНП, \$долл./год на чел.	Стоимость продления жизни, \$ за дополнительный год жизни
Китай	1114	2444	(1-6) 10 <sup>3</sup>
СССР (бывший)	2198	4996	(5-30) 10 <sup>3</sup>
Великобритания	5174	8655	(30-80) 10 <sup>3</sup>
США	8542	12532	(80-200) 10 <sup>3</sup>

Дальнейшие разработки указанной проблемы на уровне Российской Федерации и ее отдельных регионов в настоящее время проводятся большой группой специалистов "Объединенного комитета по управлению риском", образованного в 199 в рамках Государственных научно-технических программ: "Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф" и "Экологическая безопасность России". ("Управление риском в социально-экономических системах. Концепция и методы ее реализации". Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. №1, 1995 и №2, 1996).

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Обоснование целей и средств решения различных задач анализа риска .....	5
2. Ранжирование транспортных и промышленных предприятий по потенциальным масштабам аварийных выбросов .....	14
3. Математическое моделирование развития аварийных процессов и распространения поражающих факторов в окружающем пространстве .....	34
4. Критерии негативного воздействия характерных аварий на человека и окружающую среду ущерба .....	120
5. Методические особенности расчета и построения зон потенциального ущерба .....	152
6. Принципы построения полей потенциальной опасности для характерных сценариев развития аварий .....	161
7. Расчеты и построение полей риска на картографической основе .....	173
8. Анализ влияния различных факторов на интегральные показатели риска. Принципиальные основы управления риском .....	191

Компьютерная верстка

*Коломейцев А.М.*

Подписанов печать 20.08.96. Формат 70х90/16  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура "Futuris"  
Объем 16 п.л.

Отпечатано АОЗТ "Олита".  
г. Москва, ул. Б. Черемушкинская, 34. Тел./факс: 120-15-70